

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE UNB PLANALTINA

**DAIANE FERREIRA MACIEL**

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL E DA VULNERABILIDADE  
INTRÍNSECA EM AQUÍFERO POROSO POR MEIO DA  
RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO SOLO: UM ESTUDO DE CASO NA  
FAZENDA ÁGUA LIMPA (FAL/UNB), DISTRITO FEDERAL**

PLANALTINA - DF

2022

DAIANE FERREIRA MACIEL

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL E DA VULNERABILIDADE  
INTRÍNSECA EM AQUÍFERO POROSO POR MEIO DA  
RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO SOLO: UM ESTUDO DE CASO NA  
FAZENDA ÁGUA LIMPA (FAL/UNB), DISTRITO FEDERAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de  
Gestão Ambiental, como requisito parcial à obtenção do  
título de bacharel em Gestão Ambiental.

Orientadora: Andreia de Almeida

PLANALTINA - DF

2022

Maciel, Daiane Ferreira

Avaliação do potencial e da vulnerabilidade intrínseca em aquífero poroso por meio da resistividade elétrica do solo: um estudo de caso na Fazenda Água Limpa (FAL/UnB), Distrito Federal. / Daiane Ferreira Maciel. Planaltina - DF, 2022. 81 f.

Monografia - Faculdade UnB Planaltina, Universidade de Brasília.

Curso de Bacharelado em Gestão Ambiental.

Orientadora: Andreia de Almeida

1. Água Subterrânea 2. Sondagem Elétrica Vertical (SEV) 3. Sistema de Informação Geográfica (SIG). I. Maciel, Daiane Ferreira. II. Avaliação do potencial e da vulnerabilidade intrínseca em aquífero poroso por meio da resistividade elétrica do solo: um estudo de caso na Fazenda Água Limpa (FAL/UnB), Distrito Federal.

DAIANE FERREIRA MACIEL

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL E DA VULNERABILIDADE INTRÍNSECA EM  
AQUÍFERO POROSO POR MEIO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO SOLO: UM  
ESTUDO DE CASO NA FAZENDA ÁGUA LIMPA (FAL/UNB), DISTRITO  
FEDERAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Gestão Ambiental da Faculdade UnB Planaltina, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Gestão Ambiental.

Banca Examinadora:

Planaltina - DF, 19 de abril de 2022.

---

Profª. MSc Andréia de Almeida – FUP/UnB

---

Prof. Dr Carlos Tadeu Carvalho do Nascimento – FUP/UnB

---

Prof. Dr. Ricardo Tezini Minoti – FT/UnB

Dedico esse trabalho à memória da minha querida mãe Ivonete que não está mais entre nós, mas sua lembrança me inspira e me faz persistir.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar à Deus, pela vida e que até aqui me fortaleceu e me deu sabedoria para que eu pudesse concluir a graduação e não desistisse ao longo dessa jornada.

Em segundo, ao meu companheiro de vida e amigo Christian que sempre me apoiou em minhas escolhas e me acolheu em todos os momentos difíceis e que por tantas vezes ouviu com paciência minhas inseguranças.

A toda minha família e amigos com seus incentivos e palavras de consolo. Ao meu irmão Enzo Gabriel por sua ternura. E em especial, a minha amiga Karen por seu auxílio ao longo de todo o curso e na coleta de dados para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus professores pela transmissão de conhecimentos, em especial ao professor Carlos Tadeu por todas as orientações sábias e incentivo acadêmico para que eu pudesse avançar.

A minha orientadora Andreia que me auxiliou com grande paciência, bondade, dedicação e muito amor em todas as etapas deste trabalho e em todos os projetos que desenvolvemos juntas ao longo do curso.

À Fazenda Água Limpa (FAL), pela autorização para desenvolvimento de atividades de campo. Aos funcionários da FAL e da garagem da UnB que gentilmente auxiliaram nos trabalhos em campo.

Ao Laboratório de Geofísica Aplicada da UnB, por fornecer o equipamento necessário para o levantamento dos dados geofísicos. À FAP-DF e à Finep, pelo apoio financeiro para execução de atividades relacionadas a este estudo.

Ao Programa de Pós-graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos (PTARH/UnB), pelo equipamento utilizado na medição do nível da água subterrânea.

Aos membros da banca.

A Universidade de Brasília por me capacitar como gestora ambiental.

## RESUMO

A água subterrânea é a porção de água armazenada e transmitida por meio de formações geológicas que são os aquíferos. Apesar da importância e da crescente demanda de uso e exploração dos recursos hídricos subterrâneos, ainda há um déficit de estudos hidrogeológicos em relação ao potencial hídrico dos aquíferos e sobre a proteção das reservas subterrâneas, essencial para que se estabeleçam alternativas de gestão e manejo dos recursos hídricos. O trabalho se propôs a avaliar como os dados de resistividade elétrica do solo podem contribuir para a avaliação do potencial e da vulnerabilidade intrínseca à contaminação em aquífero poroso e a importância dessas informações para a gestão das águas subterrâneas, tendo como estudo de caso o da Fazenda Água Limpa (FAL/UnB). Uma possível alternativa para o monitoramento dos recursos hídricos subterrâneos é a aplicação do método geofísico elétrico de corrente contínua, com a técnica de Sondagem Elétrica Vertical (SEV) que permite identificar a camada do solo, onde possivelmente se localiza o aquífero e estimar a vulnerabilidade natural do aquífero à contaminação. Foi possível obter informações litológicas consideráveis de modo indireto, com modelos geoeletricos que apresentaram correspondência com os modelos litológicos existentes, demonstrando a possibilidade de utilização da SEV para representação das variações litológicas. Os resultados apontaram que a técnica da SEV previu o lençol freático do aquífero muito próximo ao nível de água monitorado nos poços de observação e estabeleceu as áreas definidas do aquífero com maior e menor potencialidade de água e as áreas mais propícias para o uso da água subterrânea, considerando o potencial de rendimento do aquífero e a vulnerabilidade a contaminação. Foram estimadas classes de vulnerabilidade natural a partir da aplicação de análises em Sistema de Informação Geográfica (SIG) e métodos tradicionais. De modo geral, o Aquífero da FAL foi classificado com a vulnerabilidade alta pelos métodos DRASTIC, GOD, GLSI e condutância longitudinal que se correlacionam a altos valores de resistividade e aos baixos valores de condutância longitudinal. A partir da estimativa de índices de vulnerabilidade, medidas de proteção ou remediação das águas subterrâneas poderão ser orientadas com mais precisão e com maior viabilidade econômica, nos planos de recursos hídricos.

**Palavras-chave:** Água subterrânea, Sondagem Elétrica Vertical (SEV), Sistema de Informação Geográfica (SIG)

## **ABSTRACT**

Groundwater is the portion of water stored and transmitted through geological formations that are aquifers. Despite the importance and growing demand for the use and exploitation of groundwater resources, there is still a deficit of hydrogeological studies in relation to the water potential of aquifers and the protection of groundwater reserves, which is essential for establishing alternatives for the management and management of resources water. The study aimed to evaluate how soil electrical resistivity data can contribute to the evaluation of the potential and intrinsic vulnerability to contamination in porous aquifers and the importance of this information for groundwater management, having as a case study the Farm Clean Water (FAL/UnB). A possible alternative for the monitoring of groundwater resources is the application of the direct current electric geophysical method, with the Vertical Electric Sounding (VES) technique, which allows identifying the soil layer, where the aquifer is possibly located and estimating the natural vulnerability from the aquifer to contamination. It was possible to obtain considerable lithological information indirectly, with geoelectrical models that showed correspondence with existing lithological models, demonstrating the possibility of using SEV to represent lithological variations. The results showed that the SEV technique predicted the aquifer water table very close to the water level monitored in the observation wells and established the defined areas of the aquifer with higher and lower water potential and the areas most suitable for the use of groundwater, considering the yield potential of the aquifer and vulnerability to contamination. Natural vulnerability classes were estimated from the application of Geographic Information Systems (GIS) and traditional methods. In general, the FAL Aquifer was classified with high vulnerability by the DRASTIC, GOD, GLSI and longitudinal conductance methods, which correlate with high values of resistivity and low values of longitudinal conductance. Based on the estimation of vulnerability indices, groundwater protection or remediation measures can be guided more precisely and with greater economic viability in the water resources plans.

**Keywords:** Groundwater, Vertical Electric Sounding (SEV), Geographic Information System (GIS)



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação do aquífero intergranular. ....	19
Figura 2 - Representação esquemática das categorias de métodos geofísicos aplicados, com destaque para o método elétrico de corrente contínua. ....	20
Figura 3 - Classificação do método geoeletrico, técnica de investigação e arranjo de desenvolvimento. ....	21
Figura 4 - Técnica da Sondagem Elétrica Vertical (SEV). ....	22
Figura 5 - Arranjo de Schlumberger, com distância a fixa e L crescente, utilizado para aquisição de dados geofísicos, com disposição dos eletrodos de corrente (A e B) e de potencial (M e N). ....	23
Figura 6 – Área de estudo, com indicação dos pontos de monitoramento (PM) e suas condições pedológicas (LV = Latossolo vermelho, LVA = Latossolo vermelho-amarelo, CX = Cambissolo e Hi = Gleissolo) e de uso e cobertura do solo (cerrado, campo limpo, campo sujo, pasto e eucalipto). ....	32
Figura 7 - Mapa de cobertura do solo da FAL. ....	34
Figura 8 - Mapa de geologia da FAL. ....	35
Figura 9 - Mapa de pedologia da FAL. ....	36
Figura 10 - Mapa de hidrogeologia da FAL. ....	38
Figura 11 - Fluxograma das etapas do trabalho. ....	39
Figura 12 - Equipamento resistivímetro Geopulse e quatro eletrodos dispostos no mesmo alinhamento, com um par de eletrodos (AB) para induzir a corrente elétrica no subsolo e o outro par (MN) para medir a diferença de potencial da passagem da corrente. ....	40
Figura 13 - Medição de profundidade de nível da água do aquífero intergranular poroso com sensor. ....	41
Figura 14 - Etapas de processamento dos dados. ....	43
Figura 15 - Curvas de campo e do modelo do PM1 ao PM9, com seus respectivos valores de resistividade elétrica (Ohm.m) e AB/2 (m). ....	51
Figura 16 - Modelos litológicos com os valores de espessura (m) de cada camada e resistividade elétrica (Ohm.m). ....	53
Figura 17 - Modelo de regressão da relação do nível da água medido em campo com o nível da água obtido pela SEV. ....	55
Figura 18 - Modelos geoeletricos com os valores de profundidade (m) e resistividade elétrica (Ohm.m) de cada camada. ....	56
Figura 19 - Potencial de exploração do aquífero da FAL com base em Gonçalves et al. (2009). ....	58
Figura 20 - Potencial de exploração do aquífero da FAL com base na resistividade elétrica. ....	59
Figura 21 - Potencial de exploração do aquífero da FAL com base na espessura e resistividade elétrica. ....	60
Figura 22 - Parâmetros aplicados na análise da vulnerabilidade. ....	62
Figura 23 - Mapa de vulnerabilidade do método DRASTIC. ....	63
Figura 24 - Mapa de vulnerabilidade do método GOD. ....	65
Figura 25 - Mapa de vulnerabilidade do método da condutância longitudinal. ....	66
Figura 26 - Mapa de vulnerabilidade do método GLSI. ....	67

Figura 27 - indicação de uso da água subterrânea na FAL.....	68
--	----

### LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características do domínio poroso no DF .....	37
Tabela 2 - Dados espaciais da FAL em formato vetorial .....	44
Tabela 3 - Parâmetros e categoriais adotadas para avaliação do potencial na FAL .....	46
Tabela 4 - Valores de reclassificação do DRASTIC .....	47
Tabela 5 - Valores de reclassificação do GOD.....	48
Tabela 6 - Valor/classe de vulnerabilidade de cada método de vulnerabilidade.....	48
Tabela 7 - Resistividade e espessura das camadas do modelo geoeletrico e profundidade do nível da água subterrânea (NA) .....	50
Tabela 8 - Parâmetros geoeletricos (haquífero = espessura do aquífero, paquífero = resistividade do aquífero, $\rho_w$ = resistividade da água no aquífero, S = condutância longitudinal, R = resistência transversa, F = fator de formação .....	54
Tabela 9 - Parâmetros hidráulicos obtidos em campo e estimados a partir das relações empíricas propostas com dados de SEV (K= condutividade hidráulica e T= Transmissibilidade hidráulica) .....	57
Tabela 10 - Percentual da área da FAL atribuído a cada classe de potencial de exploração do aquífero.....	60
Tabela 11 - Cálculo do parâmetro da recarga.....	61
Tabela 12 - Percentual de extensão de área atribuída à cada classe de vulnerabilidade com relação à área total da FAL.....	64

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>2. PROBLEMATIZAÇÃO .....</b>	<b>16</b>
2.1 Questão principal .....	16
2.1.1 Questão de apoio.....	16
2.2 Hipótese .....	16
<b>3. JUSTIFICATIVA .....</b>	<b>16</b>
<b>4. OBJETIVOS .....</b>	<b>17</b>
4.1 Objetivo Geral.....	17
4.2 Objetivos Específicos .....	18
<b>5. REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>18</b>
5.1 Águas Subterrâneas.....	18
5.2 Princípios do Método geofísico elétrico de corrente contínua .....	20
5.3 Método elétrico de corrente contínua aplicado à caracterização e avaliação do potencial de aquíferos porosos .....	23
5.4 Método elétrico de corrente contínua aplicado à avaliação da vulnerabilidade natural de aquíferos porosos .....	25
5.5 Qual a importância dos dados de campo para a gestão de recursos hídricos subterrâneos? .....	28
<b>6. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>32</b>
6.1. Área de estudo .....	32
6.1.1 Clima e Cobertura do Solo .....	33
6.1.2 Geologia e Solo .....	34
6.1.3 Hidrogeologia .....	36
6.2. Metodologia .....	38
6.2.1 Histórico de aquisição de dados na FAL .....	39
6.2.2 Levantamento geofísico na Fazenda Água Limpa (FAL/UnB).....	40
6.2.3 Análise dos dados de campo e elaboração dos modelos geoeletricos .....	42
6.2.4 Elaboração de mapas temáticos.....	42
6.2.5 Avaliação do potencial de águas subterrâneas na FAL .....	45
6.2.6 Avaliação da vulnerabilidade intrínseca da água subterrânea na FAL.....	46
6.2.7 Avaliação dos mapas de potencial e vulnerabilidade derivados dos dados geofísicos .....	49
<b>7. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>49</b>

7.1 Caracterização geométrica do solo na FAL .....	49
7.2 Análise de potencial de água subterrânea .....	54
7.3 Análise de vulnerabilidade de água subterrânea .....	61
7.4 Confiabilidade dos dados geofísicos e proposição de cenários de águas subterrâneas para a gestão ambiental .....	67
<b>8. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>69</b>
<b>9. RECOMENDAÇÃO PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>71</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>72</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Água subterrânea é a porção de água armazenada e transmitida por meio de formações geológicas denominadas aquíferos (Freeze e Cherry, 1979, Custodio e Llamas, 1983). Aproximadamente 30% do montante de água doce do planeta encontra-se na forma de água subterrânea, um percentual representativo em comparação com aquele contido em rios e lagos (0.3%) (Feitosa *et al.*, 2008). Além do volume considerável, águas subterrâneas são fundamentais, pois garantem o abastecimento público e são utilizadas como insumo para a produção industrial e agrícola (Hirata *et al.*, 2019; Khalilidermani *et al.*, 2021).

Aproximadamente 30% da população mundial é dependente da água subterrânea, com mais de 70% dos recursos hídricos subterrâneos destinados ao setor agrícola (Khalilidermani *et al.*, 2021). De acordo com dados do atlas de abastecimento urbano da Agência Nacional de Água e Saneamento Básico (ANA, 2021), cerca de 40% das cidades brasileiras são abastecidas exclusivamente por água subterrânea. Aquíferos abastecem mais de 70% dos municípios em Mato Grosso do Sul (80%), Piauí (78%), Maranhão (74%), Pará (74%) e Amazonas (71%).

No Distrito Federal (DF), 16% do abastecimento público é mantido por água subterrânea (ADASA, 2021; ANA, 2021). Segundo a Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal (ADASA), a partir do ano de 2019 houve um aumento na vazão captada em relação aos anos de 2017 e 2018, devido à escassez hídrica registrada nesses dois últimos anos. Dentre as regiões administrativas do DF, em um levantamento realizado pela ADASA, o sistema Sobradinho/Planaltina possui a maior quantidade de captações subterrâneas registradas (40), seguido de São Sebastião (38), Torto/Santa Maria (25), Descoberto (24), Brazlândia (5) e Lago Norte (1) (ADASA, 2021).

Nas captações subterrâneas, a vazão média equivale à aproximadamente 466,6 L/s, contabilizando 5,88% da vazão total (subterrânea + superficial) captada no Distrito Federal (ADASA, 2021). Entretanto, segundo a auditoria realizada em 2018 nos registros da ADASA pelo Tribunal de Contas do Distrito Federal (TCDF), a concessão de outorgas não considera de modo adequado a disponibilidade hídrica local, devido ao desconhecimento do total de usuários de recursos hídricos no DF e inconsistências no cálculo da disponibilidade hídrica (TCDF, 2018).

Além de questões relacionadas ao aumento na demanda, aquíferos são susceptíveis à contaminação (Abdulrazzac *et al.*, 2020). Conforme o Zoneamento Ecológico-Econômico do Distrito Federal (2017), cerca de 58% da área do DF apresenta aquíferos com elevada vulnerabilidade natural à contaminação, especialmente nas bacias hidrográficas do Lago

Paranoá, do Rio Preto e do Alto Rio São Bartolomeu (ZEE-DF, 2017). Diferentemente da vulnerabilidade integrada, que considera a existência de uma fonte de contaminação, a análise da vulnerabilidade intrínseca avalia o potencial de contaminação natural dos aquíferos em função da combinação de diferentes características fisiográficas de cada área (Zanetti, 2015; Caniani, 2015; Foster e Hirata, 1988).

Nesse sentido, mudanças na cobertura do solo podem potencializar a vulnerabilidade natural dos aquíferos por meio de alterações na estrutura do solo (Seraphim, 2018) e geração de cargas de contaminação a exemplo de efluentes domésticos dispostos em sumidouros ou fossas rudimentares, chorume oriundo da decomposição de resíduos sólidos em lixões e cemitérios, vazamento de combustíveis, dentre outros resíduos químicos provenientes de atividades industriais e agrícolas (Campos *et al.*, 2007). Além disso, no caso do DF, a população não abastecida pela Caesb utiliza poços individuais, construídos de modo inadequado e sem o controle de qualidade da água, e por serem rasos, muitas vezes, estão sujeitos à contaminação (ADASA, 2017).

A contaminação das águas subterrâneas provocada pelo vazamento de gasolina em um posto revendedor de combustível em Sobradinho – DF no ano de 2002 é um exemplo disso. De acordo com o trabalho de Távora (2010), a concentração do contaminante benzeno ultrapassou o limite de potabilidade 0,005 mg/l, indicado pelo Ministério da Saúde. Outro caso de contaminação foi apresentado em Mello *et al.* (2014), resultante do lançamento não regularizado de efluentes, advindos de lavagem, tratamento e embalagem de carnes em uma indústria em Ceilândia - DF. Devido aos efluentes terem sido lançados numa fossa não revestida, atingiram o lençol freático, dissipando-se na água subterrânea.

Considerando os exemplos acima descritos, diferentes métodos de avaliação da vulnerabilidade intrínseca ou natural possibilitam a delimitação de zonas com diferentes graus de vulnerabilidade à contaminação. A vulnerabilidade intrínseca que compõe o mapa de riscos à contaminação das águas subterrâneas no ZEE-DF (2017) foi estimada com base na combinação de dados de declividade, classe de solo e uso e cobertura do solo (Campos *et al.*, 2007).

Tradicionalmente, o estudo de vulnerabilidade natural à contaminação das águas subterrâneas pode ser realizado por meio da aplicação dos métodos DRASTIC e GOD (Zanetti, 2015; Moura *et al.*, 2016; Giacomazzo e Almeida, 2020; Oni *et al.*, 2017; George, 2021). Em geral, tais métodos consistem em uma análise multicritério, isto é, que consideram diferentes informações do aquífero, tais como o grau de confinamento, litologia e profundidade não

saturadas, recarga e textura, topografia e condutividade hidráulica na determinação das classes de vulnerabilidade.

Apesar da importância, da crescente demanda e do potencial de impacto das atividades antrópicas na qualidade dos recursos hídricos subterrâneos, é necessário o constante estudo hidrogeológico para avaliação do potencial hídrico dos aquíferos e da necessidade de proteção das reservas subterrâneas no DF (Zoby e Duarte, 2001; Campos *et al.*, 2007; ADASA, 2016). Contudo, há dificuldades de monitoramento direto dos recursos hídricos subterrâneos, devido ao elevado requerimento de recursos financeiros e de tempo, principalmente em locais com limitações de acesso, por exemplo, para perfuração de poços de observação.

Nesse sentido, o método geofísico elétrico de corrente contínua pode auxiliar na investigação da subsuperfície, em diferentes profundidades, a partir de medições realizadas na superfície do solo, o que permite a caracterização hidrogeológica de forma não invasiva (Braga, 2016). Mgbolu *et al.*, (2019) utilizaram Sondagem Elétrica Vertical (SEV), técnica empregada nos levantamentos geofísicos com método elétrico de corrente contínua, para identificar aquíferos na Nigéria. Virupaksha e Lokesh (2019) estimaram parâmetros hidráulicos e a reserva de água em aquíferos a partir de dados de resistividade elétrica do solo na bacia hidrográfica de Gurpur.

Além disso, dados de resistividade elétrica do solo podem auxiliar na avaliação da vulnerabilidade intrínseca de aquíferos, a exemplo de Ikpe *et al.* (2022), George (2021) e Barros *et al.* (2021). A partir dos valores de espessura e resistividade elétrica das camadas do solo é possível estimar os parâmetros de Dar Zarrouk (Condutância longitudinal, S, e Resistência transversa, R), que também são empregados para avaliação da vulnerabilidade intrínseca e do potencial dos aquíferos, respectivamente (Maillet, 1947; Francisco *et al.*, 2019; Barros *et al.*, 2021). Além disso, há métodos de determinação da vulnerabilidade natural, a exemplo do DRASTIC e GOD, que utilizam exclusivamente parâmetros geoeletricos. O índice GLSI (geoelectric layer susceptibility indexing) é um exemplo notório dessa categoria de métodos (Oni *et al.*, 2017; George, 2020).

Diante deste contexto, considerando a importância e a dificuldade de monitoramento direto dos aquíferos, o presente estudo se propõe a avaliar a utilização da resistividade elétrica do solo, obtida por meio da Sondagem Elétrica Vertical (SEV), no estudo do potencial de captação de água subterrânea e da vulnerabilidade intrínseca de aquífero poroso, tendo como estudo de caso a Fazenda Água Limpa (FAL), no Distrito Federal.

## **2. PROBLEMATIZAÇÃO**

### **2.1 Questão principal**

Dados de resistividade elétrica do solo, obtidos pelo método geofísico elétrico de corrente contínua, podem contribuir para a caracterização hidrogeológica dos recursos hídricos subterrâneos?

#### **2.1.1 Questão de apoio**

- Dados de resistividade elétrica do solo possibilitam localizar o aquífero?
- É possível avaliar o potencial de geração de água dos aquíferos porosos por meio da SEV?
- A vulnerabilidade natural do aquífero poroso pode ser mapeada a partir de SEV?

### **2.2 Hipótese**

SEV permite identificar a camada do solo onde se localiza o aquífero e estimar a vulnerabilidade natural do aquífero à contaminação.

## **3. JUSTIFICATIVA**

As águas subterrâneas contribuem de maneira significativa para o ciclo hidrológico, fornecem água potável e abastecem principalmente as regiões com limitada disponibilidade hídrica superficial (Mierzwa e Hespanhol, 2005; George, 2021). De acordo com a Pesquisa Distrital por Amostra de Domicílio (PDAD/ CODEPLAN, 2013), até 2013, estima-se que o DF possuía cerca de 10.533 poços tubulares profundos e 5.399 poços rasos destinados ao abastecimento domiciliar e à produção agrícola em área não atendidas pela rede da CAESB. É importante destacar que esses montantes podem ser maiores uma vez que estão defasados temporalmente e sofrem com a carência no registro de poços.

Em decorrência dos tipos de aquíferos existentes no Distrito Federal e da limitada capacidade de armazenamento e circulação, a água subterrânea deve ser utilizada como um recurso estratégico aplicado a setores específicos da economia ou como fonte de abastecimento de pequenos centros urbanos e núcleos rurais (Campos *et al.*, 2007). Conforme observado no PDAD (CODEPLAN, 2013), há menor quantidade de poços rasos, que são aqueles instalados no domínio aquífero poroso, isto é, que ocorrem na porção mais rasa da subsuperfície entre os



poros do solo. Isso se deve ao menor rendimento hídrico em comparação com os poços profundos do domínio aquífero fraturado.

Contudo, o domínio aquífero poroso do DF apresenta relevância para além da vazão explotável. O domínio aquífero poroso ou intergranular está ligado diretamente à manutenção da perenidade de drenagens no período de estiagem, uma vez que sua descarga ou escoamento de base é a mais importante fonte de água para a manutenção dos cursos d'água superficiais da região do Distrito Federal e do Cerrado (ZEE-DF, 2017; ADASA, 2018). Além disso, aquíferos porosos atuam como um filtro que tanto fornece recarga quanto retardam a propagação de contaminantes para os aquíferos profundos (Campos e Freitas-Silva, 1998). Por fim, apresentam maior vulnerabilidade frente às alterações na cobertura do solo em comparação com os aquíferos profundos. Por tais motivos, o domínio aquífero poroso foi selecionado como objeto deste estudo.

O monitoramento direto dos aquíferos exige um alto custo econômico e alta demanda de tempo para a perfuração e instalação de poços e manutenção de observações constantes. E a exploração dos recursos hídricos subterrâneos sem a devida caracterização hidrogeológica pode comprometer a sustentabilidade do sistema aquífero (Campos e Cunha, 2015). Porém, medições geoeletricas da subsuperfície do solo, aplicado por meio da técnica de sondagem elétrica vertical (SEV), podem representar uma alternativa de caracterização hidrogeológica (Virupaksha e Lokesh, 2019; Barros *et al.*, 2021).

Visto que a gestão dos recursos hídricos subterrâneos necessita de informações que caracterizem o comportamento hídrico subterrâneo, o intuito deste trabalho foi contribuir para a avaliação do potencial e da vulnerabilidade natural de aquíferos porosos. Essas informações podem orientar o ordenamento de atividades antrópicas e potencialmente contaminantes, pois, a remediação de uma área tende a ser complexa em diversas situações, no âmbito financeiro, técnico e operacional (Francisco *et al.*, 2019). Em síntese, informações sobre o potencial e a vulnerabilidade natural de aquíferos podem subsidiar o direcionamento de tomada de decisão para a gestão sustentável dos recursos hídricos subterrâneos.

## **4. OBJETIVOS**

### **4.1 Objetivo Geral**

Avaliar como os dados de resistividade elétrica do solo podem contribuir para a avaliação do potencial e da vulnerabilidade intrínseca à contaminação em aquífero poroso e a

importância dessas informações para a gestão das águas subterrâneas, tendo como estudo de caso o da Fazenda Água Limpa (FAL/UnB).

#### **4.2 Objetivos Específicos**

- i) Caracterizar o comportamento geoeletrico do solo na FAL;
- ii) Identificar a contribuição dos dados de resistividade elétrica do solo para a análise do potencial de aquíferos porosos; e
- iii) Avaliar a aplicabilidade de dados geoeletricos no mapeamento da vulnerabilidade natural de aquífero poroso.

### **5. REFERENCIAL TEÓRICO**

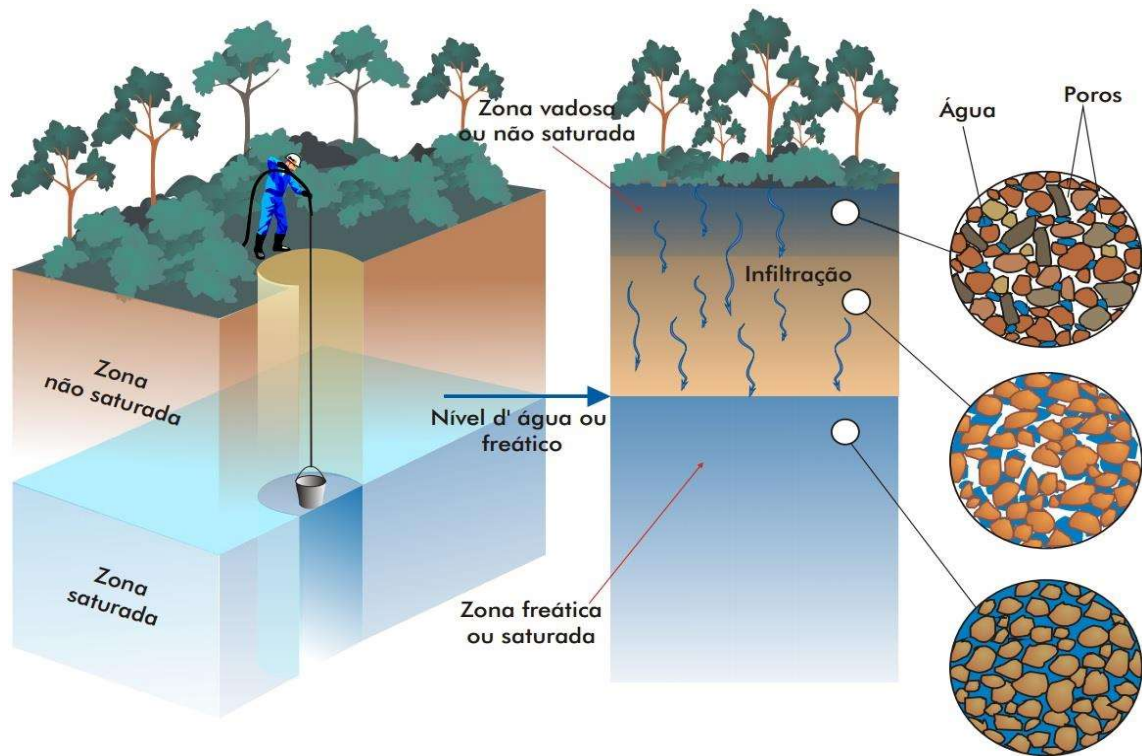
#### **5.1 Águas Subterrâneas**

A água subterrânea é encontrada em formações geológicas parcialmente ou totalmente saturadas, abaixo da zona não saturada da subsuperfície (Feitosa *et al.*, 2008). A zona não saturada pode se dividir em: (1) zona de evapotranspiração, no qual a umidade é retida pelas plantas e pela evaporação; (2) zona de retenção, nos quais estão os poros praticamente não saturados e (3) zona capilar, que possui a umidade próxima da saturação (Braga, 2007). A zona saturada abaixo da superfície corresponde a parte abaixo do nível freático, onde os espaços do solo são preenchidos com água (Feitosa *et al.*, 2008). O limite entre as zonas saturada e não saturada é denominado nível ou lençol freático (Braga, 2007).

Em função do material constituinte, os aquíferos podem ser classificados como porosos, cársticos ou fraturados. Os aquíferos porosos ou granulares (Figura 1) ocorrem nos espaços intergranulares do solo (Braga, 2007). Os cársticos ocorrem nos espaços resultantes da dissolução de rochas, especialmente rochas carbonatadas (Karmann, 2008). Os aquíferos fraturados são identificados em fissuras, fendas ou fraturas de rochas (Braga, 2007).

Quanto ao grau de confinamento, os aquíferos podem ser identificados como livres ou confinados. No aquífero livre as águas estão submetidas, apenas, à pressão atmosférica, como se estivessem em um reservatório ao ar livre; e, no aquíferos confinado as águas estão armazenadas entre camadas impermeáveis e sob pressão superior à atmosférica (Braga, 2007).

Figura 1 - Representação do aquífero intergranular.



Fonte: Karmann (2008)

Os parâmetros hidráulicos de condutividade hidráulica ( $K$ ) e transmissividade ( $T$ ), são fundamentais para a caracterização dos aquíferos. A condutividade hidráulica ( $k$ ) é tida como o volume de água que flui através de uma unidade de área do solo por unidade de tempo (Lamari, 2000). A condutividade hidráulica indica a capacidade da formação aquífera em exercer a função de condutor hidráulico (Feitosa *et al.*, 2008). A condutividade depende das características do meio (permeabilidade, porosidade e tamanho das partículas e sua distribuição) e das propriedades do fluido (Braga, 2007; Feitosa *et al.*, 2008).

Através da Equação 1 possibilita relacionar a condutividade com a permeabilidade ( $P$ ) e as devidas propriedades do fluido. No qual, a condutividade hidráulica é o resultado do produto da permeabilidade do meio pela densidade do fluido ( $\rho$ ) e o quociente da aceleração devida à gravidade ( $g$ ) pela viscosidade dinâmica do fluido ( $n$ ) (Feitosa *et al.*, 2008).

$$K = \frac{P \cdot \rho \cdot g}{n}$$

(1)

Partindo dos dados de  $K$  pode-se estimar o outro parâmetro hidráulico, a transmissividade ( $T$ ) (Equação 2) do aquífero, que caracteriza a quantidade de água que é

possível ser transmitida horizontalmente pela camada saturada do aquífero (h) (Virupaksha e Lokesh, 2019).

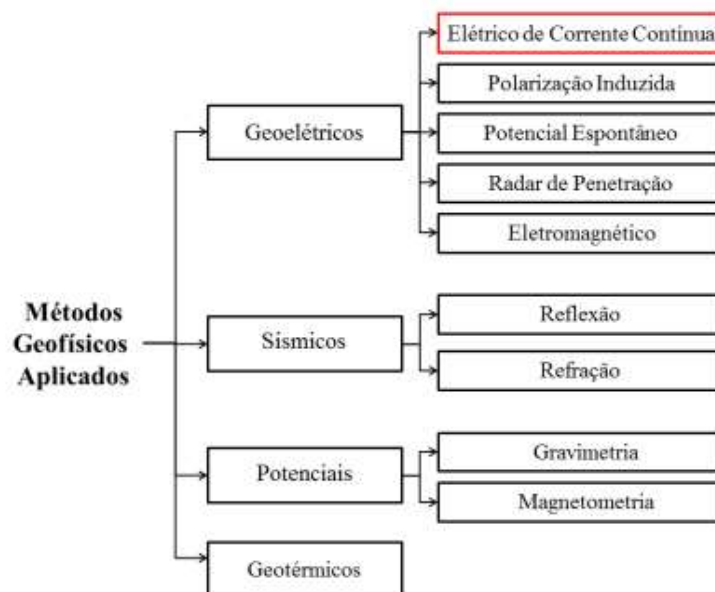
$$T = K \cdot h \quad (2)$$

Assim, se os aquíferos são capazes de transmitir o máximo de água, significa a possibilidade de potencial de recarga (Virupaksha e Lokesh, 2019). Mas, menos ou nenhuma transmissividade dos aquíferos indica a má condutividade hidráulica ou a falta da zona de recarga potencial (Virupaksha e Lokesh, 2019).

## 5.2 Princípios do Método geofísico elétrico de corrente contínua

A geofísica permite a investigação de diferentes propriedades da subsuperfície de forma não invasiva a partir da superfície do solo. Dentre os métodos geofísicos existentes, o método geofísico elétrico de corrente contínua tem como parâmetro de interesse a resistividade elétrica ( $\rho$ ) (Telford *et al.*, 1990) (Figura 2). O método elétrico de corrente contínua se baseia na Lei de Ohm que representa a proporcionalidade direta entre a intensidade da corrente elétrica que percorre um condutor e a diferença de potencial entre os terminais desse condutor (Feitosa *et al.*, 2008).

Figura 2 - Representação esquemática das categorias de métodos geofísicos aplicados, com destaque para o método elétrico de corrente contínua.



Fonte: Adaptado de Telford *et al.* (1990)

A resistividade elétrica ( $\rho$ ), expressa em  $\Omega.m$ , é uma medida da resistência  $R$  à passagem da corrente elétrica ao longo do comprimento  $L$  em um determinado material (Orellana, 1972). Assim, a resistividade elétrica é influenciada principalmente pela umidade e a concentração de sólidos dissolvidos (Al-Othman, 2011). Além disso, esse parâmetro varia em função da porosidade e da resistividade do fluido contido nos poros do solo (Loke, 2000; Asry *et al.*, 2012).

O levantamento geofísico requer além do método, a definição da técnica, que se refere ao modo como o levantamento será executado, e do arranjo, que é a forma que os eletrodos de corrente e de potencial são dispostos na superfície do terreno. Dentre as técnicas existentes, a sondagem elétrica vertical (SEV) (Figura 4) possibilita investigar a resistividade em profundidade, com a separação crescente entre os eletrodos de corrente (AB) e manutenção dos eletrodos de potencial (MN) parcialmente fixos no centro do levantamento (Braga, 2016). E conforme a distância entre os eletrodos aumenta, as medições de resistividade devem atingir camadas cada vez mais profundas (Braga, 2016).

**Figura 3 - Classificação do método geoeletrico, técnica de investigação e arranjo de desenvolvimento.**



**Fonte: Braga (2007)**

Com relação aos arranjos, existem os arranjos de Schlumberger e de Wenner, ambos amplamente aplicados para o desenvolvimento da técnica da SEV (Figura 5). No arranjo de Schlumberger os eletrodos são distribuídos ao longo de uma linha reta e com a distância  $a$  entre os eletrodos  $M$  e  $N$  fixa e tende a zero em relação à distância crescente de  $L$  (Braga, 2007). No arranjo de Wenner, os quatro eletrodos apresentam uma separação  $a$  crescente e constante sendo deslocados simultaneamente, mantendo sempre a relação:  $AM = MN = NB = a$ , e o centro do arranjo ( $o$ ) permanece fixo (Braga, 2007).

Figura 4 - Técnica da Sondagem Elétrica Vertical (SEV).



Fonte: Braga (2008)

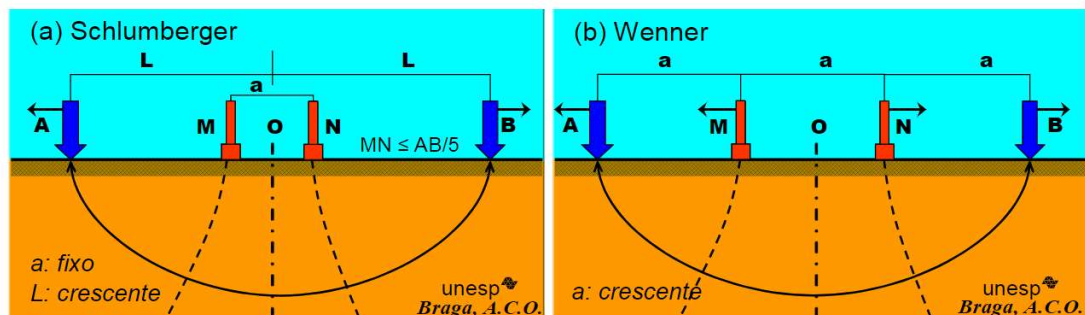
Com base no arranjo de Schlumberger, a resistividade aparente em um dado ponto do terreno é determinada pela Equação 3, onde  $I$  caracteriza a intensidade da corrente em amperes ( $A$ ),  $\Delta V$  representa a diferença de potencial do terreno, em volts ( $V$ ),  $AB$  é a distância de separação dos eletrodos de corrente e  $MN$  é a distância entre os eletrodos de potencial, ambos em metros ( $m$ ) (Orellana, 1972).

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}}$$

(3)

Com poucas diferenças entre os dois tipos de arranjos (Figura 6), o de Schlumberger é considerado mais adequado devido à praticidade e qualidade dos resultados (Braga, 2007). As leituras, ficam menos sujeitas às variações laterais no parâmetro físico medido e apresentam maior precisão, com uma interpretação mais realista (Braga, 2007).

Figura 5 - Arranjo de Schlumberger, com distância a fixa e L crescente, utilizado para aquisição de dados geofísicos, com disposição dos eletrodos de corrente (A e B) e de potencial (M e N).



Fonte: Braga (2016)

### 5.3 Método elétrico de corrente contínua aplicado à caracterização e avaliação do potencial de aquíferos porosos

A resistividade elétrica é inversamente proporcional ao quantitativo de água presente no solo e ao conteúdo do material em solução na água (Orellana, 1972). Assim, a obtenção de dados geoeletricos do solo pode apontar o comportamento da água subterrânea, como: nível do aquífero no solo, camadas litológicas mais favoráveis à geração de água e a espessura da camada aquífera (Rosa *et al.*, 2017). Além disso, contatos geológicos e descontinuidades de camadas podem ser identificados em função de características elétricas das rochas e dos solos (Silva *et al.*, 2018).

Dessa forma, há trabalhos publicados que demonstram a relação da aplicação do método geofísico elétrico de corrente contínua para o conhecimento da profundidade da água subterrânea (Cutrim e Shiraiwa, 2011; Nyquist *et al.*, 2008; Zhou e Sato, 2001). No trabalho de Almeida (2013) há o uso dos valores de resistividade elétrica para a compreensão do comportamento do nível da água em aquífero na Estação Ecológica de Águas Emendadas (ESECAE) em Planaltina - DF, visando a colaboração para o processo de manejo e gestão das águas subterrâneas na região. Moreira *et al.* (2013) também utilizaram SEV, porém visando a determinação da profundidade do nível freático e a estimativa da espessura de horizontes aquíferos.

A aquisição de dados de resistividade é uma prática consolidada nas áreas de mineração e investigação geotécnica, sendo recente sua utilização em estudos ambientais (Telford *et al.*, 1990; Bazin e Pfaffhuber, 2013). De acordo com Asry *et al.* (2012), o interesse crescente pelos recursos hídricos subterrâneos ocasionou estudos intensivos a respeito da geometria e das propriedades dos aquíferos, com papel de relevância para aplicação dos métodos geofísicos, especialmente na identificação da profundidade da água subterrânea. Devido à dificuldade de

monitoramento direto das estruturas subsuperficiais, Bièvre *et al.* (2012) ressaltam a importância da associação de dados hidrogeológicos e hidrogeofísicos no estudo do comportamento da água no solo.

É possível relacionar as propriedades elétricas e hidrodinâmicas dos materiais geológicos e espessura das camadas de um aquífero para estimar as características hidráulicas de um aquífero granular (Carlos *et al.*, 2012). Sikandar e Christen (2012) e Okiongbo e Mebine (2015), por exemplo, estimaram parâmetros hidráulicos em aquíferos intergranulares a partir da aplicação da técnica geofísica de sondagem elétrica vertical (SEV).

Dessa forma, para aquíferos granulares pode-se estabelecer uma relação empírica entre os parâmetros geoeletricos ( $\rho$ , parâmetros de Dar Zarrouk e Fator de Formação, F) e os parâmetros hidráulicos dos aquíferos (Porosidade, Condutividade Hidráulica e Transmissividade) (Carlos *et al.*, 2012). Os parâmetros de Dar Zarrouk resistência transversal (R) e condutância longitudinal (S) representam, respectivamente, as componentes verticais da resistência e as componentes horizontais da resistência, que são indicadores da capacidade de proteção e transmissividade do aquífero, respectivamente (Equação 4 e 5) (Maillet, 1947). Portanto, eles podem ser utilizados na avaliação do potencial e da capacidade da superfície em proteger o aquífero.

$$R = p_{\text{aquifero}} \cdot h_{\text{aquifero}} \quad (4)$$

$$S = \frac{h}{p} \quad (5)$$

A lei de Archie possibilita estimar o parâmetro geoeletrico de fator de formação (F), sendo a relação entre a resistividade da rocha saturada ( $\rho_r$ ) e a resistividade da água de saturação ( $\rho_e$ ), representada pela (Equação 6). Essa razão não depende da salinidade da água de saturação, mas apenas da textura e porosidade do material rochoso (Feitosa *et al.*, 2008). Por isso, pode ser utilizada como indicativo da porosidade do solo.

$$F = \frac{\rho_r}{\rho_e} \quad (6)$$



Kotb *et al.* (2018) calcularam os parâmetros de Dar Zarrouk, aplicando as equações estabelecidas por Maillet (1947), além de modificações propostas por Bhattacharya e Patra (1968), aos dados de SEV, com o objetivo de identificar aquíferos rasos, com a profundidade da água variando entre 20 e 63 m. Neste estudo, foram realizadas SEVs em dois locais próximos aos poços de monitoramento de água subterrânea para estimar e correlacionar os parâmetros geofísicos disponíveis e comparar as camadas geoeletricas com os estratos geológicos.

Oguama *et al.* (2019), ao avaliar a disponibilidade e a vulnerabilidade das águas subterrâneas por meio, dentre outras técnicas, da SEV, estimou a condutividade hidráulica conforme Heigold *et al.* (1979), utilizando os parâmetros de Dar Zarrouk. Em seus resultados, camadas aquíferas altamente condutoras foram identificadas na presença de materiais de baixa resistividade elétrica. Niwas e Celik (2012) estimaram a porosidade do aquífero por meio dos valores de F. Com isso, observa-se que os métodos geofísicos podem ser utilizados como uma possível alternativa aos métodos hidrogeológicos de campo (Fatoba, 2014). A partir da condutividade hidráulica, por exemplo, que é um dos principais parâmetros hidráulicos, é possível analisar a capacidade de produção de água no solo.

#### **5.4 Método elétrico de corrente contínua aplicado à avaliação da vulnerabilidade natural de aquíferos porosos**

Além de possibilitar avaliar aspectos quantitativos dos aquíferos, através dos dados geofísicos é possível a avaliação da vulnerabilidade do aquífero. Há a vulnerabilidade intrínseca (ou natural) e a vulnerabilidade integrada (ou específica). Sendo que a vulnerabilidade específica considera as fontes dos poluentes e a vulnerabilidade natural trata da maior ou menor susceptibilidade de contaminação do aquífero (Caniani *et al.*, 2015). Para o subsídio de planejamento do uso e a ocupação do solo, assim como a utilização dos recursos hídricos, é necessário conhecer os níveis de sensibilidade ambiental (Zanetti, 2015). Assim, prevendo possíveis áreas mais sensíveis à contaminação é possível o melhor direcionamento para a gestão dos recursos hídricos.

Tradicionalmente, diferentes métodos de avaliação de vulnerabilidade à contaminação de aquíferos são empregados no monitoramento da qualidade das águas subterrâneas e na estimativa de risco de contaminação dos aquíferos, a exemplo dos métodos GOD (Foster e Hirata, 1988) e DRASTIC (Aller *et al.* (1987).

O método GOD proposto por Foster e Hirata (1988) e modificado por Foster *et al.* (2006) é muito utilizado na avaliação de aquíferos por ter aplicação simples e fácil análise dos

resultados e capaz de auxiliar no gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos e no planejamento de políticas públicas (Duarte *et al.*, 2016). Este método é baseado em três parâmetros: “G” (Groundwater hydraulic confinement) que indica o grau de confinamento do aquífero, variando de 0 a 1; “O” (Overlying strata) que indica o tipo de litologia da zona não saturada, variando de 0 a 1; “D” (Depth to groundwater table) que aponta à profundidade do nível d’água, variando de 0 a 1 (Foster *et al.* 2006; Duarte *et al.*, 2016).

De acordo com Foster *et al.*, (2006) o índice de vulnerabilidade é o resultado da combinação dos três parâmetros (Equação 7), nos quais os valores que se aproximam de 0 significam menores índices de vulnerabilidade e os valores próximos de 1 indicam maiores índices de vulnerabilidade.

$$GOD = G \times O \times D$$

(7)

O método DRASTIC, proposto por Aller *et al.* (1987), classifica hierarquicamente os parâmetros hidrogeológicos: “D” (Profundidade da zona não saturada); “R” (Recarga do aquífero); “A” (Material do aquífero); “S” (Tipo de solo); “T” (Topografia); “I” (Impacto da zona não saturada); “C” (Condutividade hidráulica) (Cutrim e Campos, 2010).

Cada um dos sete parâmetros recebe um valor  $r$ , e estes valores são multiplicados por um peso  $w$ , entre 1 e 5, de acordo com as características do meio, como demonstra a Equação 8, nos quais os parâmetros mais relevantes recebem peso 5 (Cutrim e Campos, 2010). E com a soma dos valores obtidos para cada parâmetro, é obtido o valor do índice de vulnerabilidade (Zenatti, 2015).

$$DRASTIC = DrDw + RrRw + ArAw + SrSw + TrTw + Irlw + CrCw$$

(8)

De acordo com Cutrim e Campos (2010), a vulnerabilidade pode ser extrema que significa que o aquífero é vulnerável à maioria das águas contaminadas, com impacto significativo. A vulnerabilidade alta indica que é vulnerável por muitos poluentes; a vulnerabilidade moderada indica que o aquífero é vulnerável a alguns contaminantes, mas somente quando lançados ou despejados continuamente; a vulnerabilidade baixa indica que o aquífero é vulnerável somente a contaminantes conservativos em longo prazo, quando continuamente e largamente despejados ou lançados; e a vulnerabilidade desprezível significa

que o aquífero é confinado por camadas com insignificante fluxo vertical de água subterrânea. A menor vulnerabilidade não significa que o aquífero seja totalmente imune à contaminação.

Contudo, apesar de serem métodos de aplicação relativamente simples baseados na análise multicritério, isto é, que combina diferentes camadas de informação sobre os aquíferos, métodos como GOD e DRASTIC necessitam de dados de campo nem sempre acessíveis, tais como profundidade do nível da água, condutividade hidráulica, litologia e textura do solo. Nesse sentido, dados geoeletricos do solo tem contribuído para a avaliação da vulnerabilidade natural dos aquíferos. Conforme afirmam Zarroca *et al.* (2014), levantamentos geofísicos contribuem para a estimativa indireta de parâmetros essenciais aos estudos de contaminação de aquíferos.

A condutância longitudinal estimada com base nos valores de resistividade aparente e espessura das camadas do solo, está diretamente associada ao fator de proteção do aquífero. Quanto maior o valor de condutância da camada sobrejacente, maior o grau de proteção do aquífero frente aos contaminantes, em função do maior tempo de percolação exigido (Braga, 2008).

Segundo Francisco *et al.* (2019), a condutância longitudinal (S) combina dois parâmetros para a estimativa de vulnerabilidade natural das águas subterrâneas: a profundidade do aquífero e o tipo dos materiais da zona não saturada, que se relacionam aos valores de resistividade elétrica. Pois se deve a razão entre as espessuras e resistividades elétricas das camadas sobrejacentes ao aquífero. A identificação de áreas de recarga de aquífero que são mais susceptíveis à contaminação, podem ser reconhecidas a partir de uma técnica geofísica de sondagem elétrica vertical como discutido no trabalho de Barros *et al.* (2021).

De acordo com Braga (2016) partindo do cálculo da condutância longitudinal total (S, Equação 9) da zona não saturada, quanto maior for o valor de S, maior será o grau de proteção do aquífero, sendo que quanto maior for a espessura da zona insaturada, maior será o tempo de percolação do contaminante e que quanto menor for a resistividade, o material é mais argiloso e menos permeável.

$$S = \frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2} + \frac{h_3}{\rho_3} + \dots + \frac{h_n}{\rho_n} \quad (9)$$

É possível a identificação da vulnerabilidade da água subterrânea à contaminação, devido, por exemplo, a predominância de pequenas profundidades do NA e materiais arenosos

que são muito permeáveis, correlacionando a altos valores de resistividade que resulta em baixos valores de condutância longitudinal unitária (Francisco *et al.*, 2019).

Mais recentemente, índices têm sido derivados da combinação de parâmetros geoeletricos, a exemplo do GLSI. De acordo com Oni *et al.*, (2017) GLSI determinado pela equação (10) é um método de avaliação de vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas que se baseia no parâmetro da resistividade elétrica a partir do contraste da resistividade elétrica entre as camadas litológicas no subsolo. Utiliza assim o parâmetro geoeletrico da resistividade e a espessura da camada.

$$GLSI = \frac{((\rho_1 + h_1)/2 + (\rho_2 + h_2)/2 + (\rho_3 + h_3)/2 + \dots + (\rho_n + h_n)/2)}{N} \quad (10)$$

Segundo Oni *et al.*, (2017) o método da condutância longitudinal é uma técnica que indica o grau de proteção de um aquífero em vista de contaminantes que percolem verticalmente, considerando diretamente proporcional à razão entre a espessura e a resistividade elétrica.

### **5.5 Qual a importância dos dados de campo para a gestão de recursos hídricos subterrâneos?**

De acordo com Hirata *et al.* (2019) no Brasil, as águas subterrâneas extraídas por poços tubulares não possuem números reais conhecidos, mesmo havendo a obrigatoriedade da outorga para o uso da água, totalizando pouco mais de 1% de captações regulares. Logo, a clandestinidade da quantidade de água extraída desestabiliza os estudos de identificação das reservas aquíferas.

Os principais problemas no uso das águas subterrâneas no Distrito Federal estão ligados à superexploração dos aquíferos, à impermeabilização das áreas de recarga regionais e à falta de conhecimento sobre a disponibilidade hídrica (Campos, 2004). É importante ressaltar ainda a ocorrência da construção indevida dos poços, especialmente nos finais de semana, momento em que não ocorre fiscalização por parte da ADASA (Ricardo Tezini Minotti, presidente do Comitê da Bacia do Rio Paranaíba-DF, Comunicação oral, 2022). E com o passar dos anos a exaustão das reservas hídricas subterrâneas devido ao bombeamento com vazões discrepantes às taxas de realimentação e a vulnerabilidade à contaminação devido à infiltração de cargas poluentes se intensificaram (Campos e Cunha, 2015).

A eficácia de um processo de gestão de recursos hídricos subterrâneos depende da aplicação efetiva de ferramentas que auxiliem nesse processo. Dentre elas previstas no art 6º. ainda da LEI Nº 2.725/2001:

- **Planos de Recursos Hídricos:** Denominados planos diretores que fixam as diretrizes básicas para a implementação da Política de Recursos Hídricos e o devido gerenciamento dos recursos hídricos;
- **Enquadramento dos corpos de água em classes:** São enquadrados segundo os usos preponderantes da água e devem assegurar às águas qualidade compatível com os usos mais exigentes, observando a legislação em vigente; diminuir custos de gestão de recursos hídricos;
- **Outorga do direito de uso de recursos hídricos:** Responsável por assegurar o controle quantitativo e qualitativo dos usos da água e a efetividade do exercício dos direitos de acesso à água.
- **Cobrança pelo uso de recursos hídricos:** Busca reconhecer a água como bem econômico e como insumo produtivo dando ao usuário a indicação do valor real; incentiva a racionalização do uso da água e obtém recursos financeiros para realização dos Planos de Recursos Hídricos;
- **Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos:** abrange atividades de coleta, tratamento, armazenamento, recuperação de dados e difusão de informações sobre recursos hídricos e fatores que intervenham na gestão.

Pode-se considerar que dentre as ferramentas de gestão das águas a outorga do direito de uso de recursos hídricos é uma das mais importantes, caracterizada como sendo um instrumento de controle administrativo. A concessão ou não da outorga marca o efetivo exercício do poder de polícia das águas pelo estado (Campos *et al.*, 2007), atribuição na PNRH no Art. 14, que cita que a efetividade da outorga deve se dar por ato da autoridade competente do Poder Executivo Federal, dos Estados ou do Distrito Federal.

O Decreto Distrital Nº 22.358, de 31 de agosto de 2001 representa a regulamentação do inciso II, do Art. 12 da lei Nº 2.725/2001 que trata da outorga a extração de água de aquífero subterrâneo para consumo final ou insumo de processo produtivo. Assim, o Art.10 condiciona a outorga ao parâmetro de potencialidade do aquífero para exploração dos subsistemas aquíferos existentes no território do Distrito Federal e deve ser constantemente atualizado, por meio de estudos hidrogeológicos e da atualização dos dados de exploração (Campos *et al.*, 2007).

Deve-se destacar ainda, a recente divulgação da Resolução Nº 001 da ADASA (2022) que Institui o Cadastro de Agentes Perfuradores de Poços no Distrito Federal afim de coibir a prática de perfuração irregular de poços tubulares e manuais e para o controle dos processos de perfuração que exigem outorga prévia para os usos das águas subterrâneas.

Acerca dos problemas associados às águas subterrâneas, segundo Campos *et al.* (2007) não são técnicos, mas gerenciais e administrativos. Nos quais, as decisões gerenciais são respectivas ao volume de extração, à localização dos poços, e assim, a operacionalidade e as experiências técnicas e administrativas na gestão das águas subterrâneas elaboradas por órgãos nacionais e internacionais podem ser úteis para a otimização da gestão no Distrito Federal.

A regulação, o controle e a fiscalização das águas subterrâneas são atribuições da Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento do Distrito Federal (ADASA), regida pelos fundamentos, objetivos, diretrizes e instrumentos das políticas nacional e distrital de recursos hídricos (Campos *et al.*, 2007). No DF, segundo o relatório da Adasa, 2018 as águas subterrâneas desde o início de 1970 tiveram a função de complementar o sistema de abastecimento de água público. Atualmente, é estimado que 16% do abastecimento no Distrito Federal seja de captações de aquíferos a partir de poços tubulares (Adasa, 2018).

Para uma gestão efetiva, é necessária uma agência reguladora de dados, estudos, subsídios e instrumentos para a gestão (Adasa, 2016), com parâmetros legais e técnicos que devem ser os guias para os argumentos primários de definição da sistemática de gestão dos recursos hídricos subterrâneos, com enfoque na exploração das águas subterrâneas (Mello e Castro, 2011).

Há ainda as ferramentas não formalizadas nas políticas de recursos hídricos (Campos *et al.*, 2007):

- **Fiscalização:** Responsável pela verificação do cumprimento da outorga, de construções de poços e da cobrança para a construção de proteção dos poços.
- **Estudos Hidrogeológicos:** Deve ser constantemente atualizado para a devida gestão dos recursos hídricos subterrâneos, pontuando, os parâmetros hidrodinâmicos dos aquíferos e as reservas exploráveis, e a inter-relação das águas subterrâneas e superficiais.

Dessa forma, considerando a Resolução CNRH nº 15, de 11 de janeiro de 2001, que estabelece diretrizes para a gestão integrada de águas subterrâneas e na Resolução CNRH nº 17, de 29 de maio de 2001, que estabelece diretrizes complementares para a elaboração dos Planos de Recursos Hídricos de bacias hidrográficas, dispõe no Art. 2º sobre os Planos de Recursos Hídricos promoverem a caracterização dos aquíferos e definir as inter-relações de cada aquífero com os demais corpos hídricos superficiais e subterrâneos e com o meio ambiente, buscando à gestão sistêmica, integrada e participativa das águas.

Dentre os métodos de gestão, deve haver a fiscalização para que haja licenças de exploração para os poços tubulares, conhecimento hidrogeológico e redução no bombeamento

das águas subterrâneas para evitar que o bombeamento interfira nas nascentes que alimentam a rede de drenagem superficial (Campos e Cunha, 2015) e um processo de outorga para o uso correto das reservas aquíferas.

O banco de dados a ser utilizado nos cálculos e estudos, deve ser georreferenciado e estar presente em um sistema de informações geográficas, juntamente com a elaboração e incremento de instrumentos para gestão territorial e dos recursos hídricos: leis, projetos e estudos para que estabeleçam parâmetros técnicos para utilização do solo e da água (ADASA, 2016). E concomitantemente, a gestão de águas deve estar em consenso com os Planos Diretores que estabelecem os parâmetros para garantir a sustentabilidade e proteção ambiental, assegurando a redução dos riscos de danos causados pelo processo de urbanização (ADASA, 2016).

Para o maior controle da utilização das águas subterrâneas é necessário um maior conhecimento dos aquíferos e de sua exploração sustentável. Partindo deste pressuposto, é essencial a obtenção de dados de campo para o estabelecimento das características hidrogeológicas. A caracterização litológica e a permeabilidade do meio são alguns dos parâmetros mais difíceis de serem obtidos em estudos de vulnerabilidade à contaminação de aquíferos (Foster *et al.*, 2002; Foster *et al.*, 2013).

Para auxiliar nessa questão, mapas de resistividade podem ser elaborados a partir dos resultados das SEVs. Os valores de resistividade tanto nas zonas saturadas quanto nas zonas não saturadas apontam uma variação na porcentagem entre areia e argila, no qual as resistividades mais baixas indicam maiores concentrações de argila, o que altera a capacidade de retenção de contaminantes (Barros, 2021).

Resultados que são obtidos a partir de interpretações de dados de campo de resistividade aparente ( $\rho_a$ ) apontam a espessura ( $h$ ) e resistividade ( $\rho$ ) das camadas de subsuperfície. Os dados de campo fornecidos pela técnica de Sondagem Elétrica Vertical (SEV) são capazes de compor um banco de dados a respeito do comportamento geoeletrico do solo e das características hidrogeológicas dos aquíferos. Visto que são dados necessários para tomada de decisões e manejo dos recursos hídricos subterrâneos.

Os dados geoeletricos são fundamentais para a caracterização hidrogeológica que deve compor os planos de recursos hídricos. Segundo a Resolução nº 01 de 2011 da ADASA há a necessidade de se definir as disponibilidades hídricas dos aquíferos subterrâneos, obtidas por estudos hidrogeológicos, no intuito de otimizar o controle e o monitoramento das reservas hídricas subterrâneas no território do Distrito Federal. Dessa maneira, ressalta-se a relevância

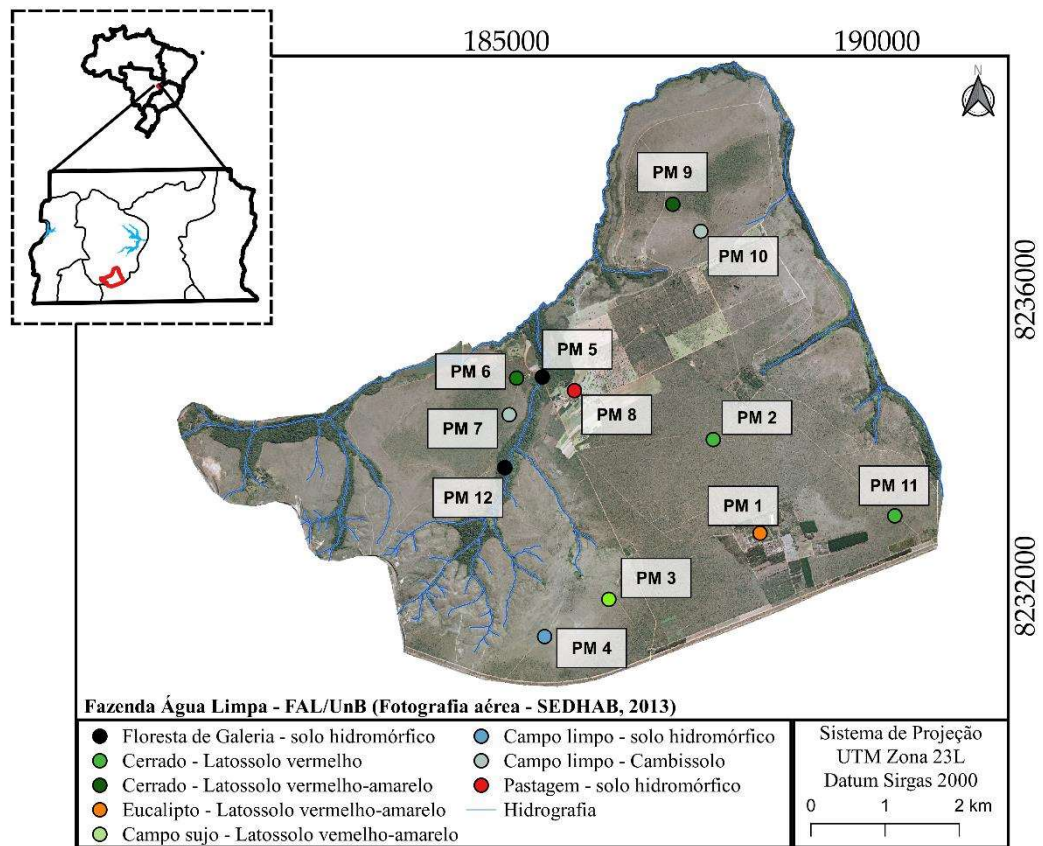
da coleta de dados, obtidos de forma indireta, por meio de métodos geofísicos para a caracterização hidrogeológica, necessária para a composição dos planos de recursos hídricos e composição de banco de dados de informações de reservas aquíferas.

## 6. MATERIAL E MÉTODOS

### 6.1. Área de estudo

A área de estudo em que se realizou o levantamento geofísico foi na Fazenda Água Limpa (FAL) (Figura 7), nas imediações de onze poços de monitoramento de água subterrânea no domínio aquífero poroso, com diferentes condições pedológicas e de cobertura do solo. A FAL é uma Fazenda Experimental da UnB, com área de aproximadamente 43 km<sup>2</sup>, localizada no Distrito Federal (UnB, 2009).

**Figura 6 – Área de estudo, com indicação dos pontos de monitoramento (PM) e suas condições pedológicas (LV = Latossolo vermelho, LVA = Latossolo vermelho-amarelo, CX = Cambissolo e Hi = Gleissolo) e de uso e cobertura do solo (cerrado, campo limpo, campo sujo, pasto e eucalipto).**



Fonte: Autoria própria



Juntamente com a Reserva Ecológica do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (RECOR IBGE) e a Estação Ecológica do Jardim Botânico de Brasília (JBB), a Estação Ecológica da UnB, contida na FAL, constitui a Área de Proteção Ambiental (APA) das Bacias do Gama e Cabeça-de-Veadão (Felfili, 1993). A área abrange outras unidades de conservação, tais como a ARIE (Área de Relevante Interesse Ecológico) Capetinga Taquara e a APA do Planalto Central.

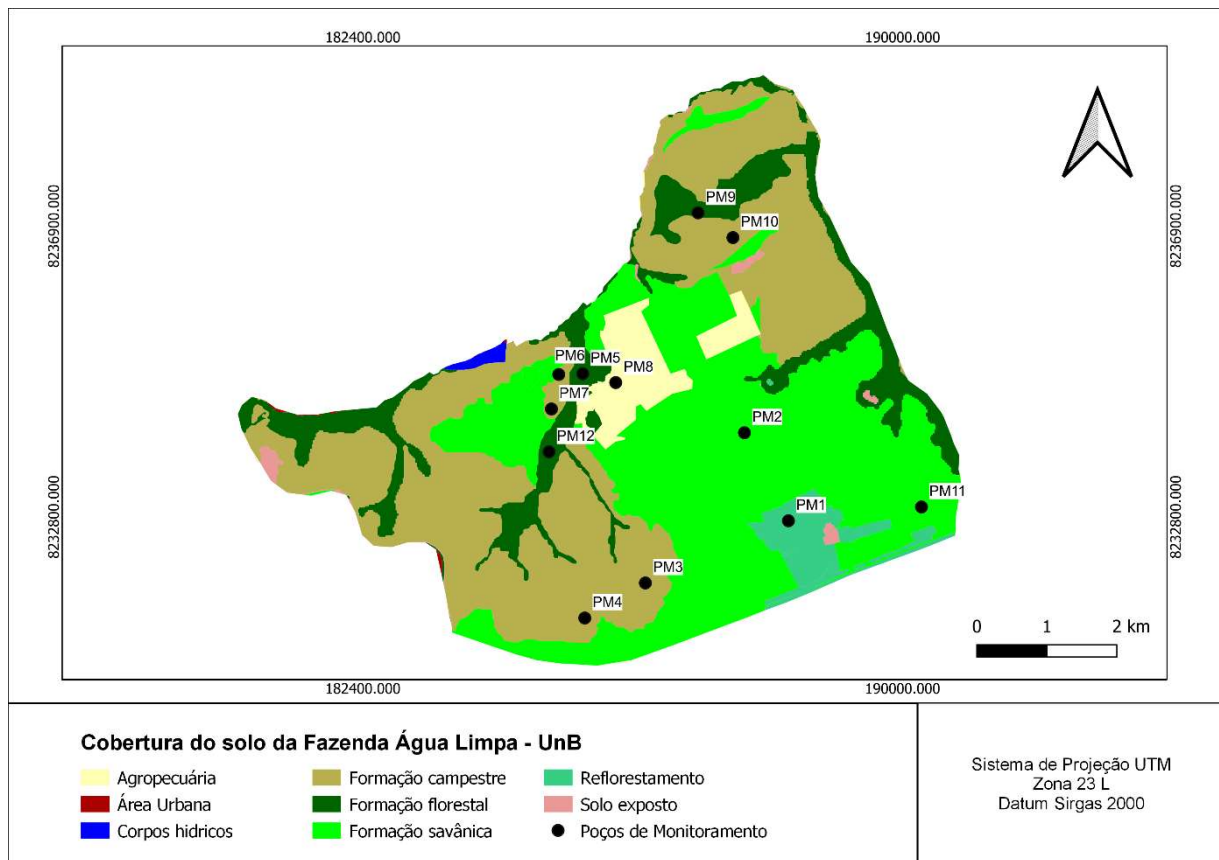
### **6.1.1 Clima e Cobertura do Solo**

Segundo critérios da classificação de Köpen, o clima da região é do tipo Aw, com temperatura média mensal superior a 22°C na maior parte do ano (CODEPLAN, 1984) e com precipitação média de 1.500 mm anuais, ocorrendo predominantemente entre os meses de outubro e março (Maia e Baptista, 2008).

Segundo Maia e Baptista (2008) o clima do Distrito Federal que está no bioma do Cerrado é caracterizado, principalmente, pela ocorrência de duas estações contrastantes. A estação de chuvas que ocorre em setembro/outubro a março/abril, com cerca de 90% das precipitações, e a estação de estiagem, de abril/maio a setembro que raramente chove mais que 9,0mm/mês.

De acordo com os dados vetoriais de GEINFO/DIGEO/SINC/SEGETH (2019), a cobertura do solo da FAL é composta predominantemente por formação savânica, formação florestal e formação campestre. E há pequenas porções da área com plantio de eucalipto (reflorestamento), atividades agropecuárias e solo exposto (Figura 8).

**Figura 7 - Mapa de cobertura do solo da FAL.**



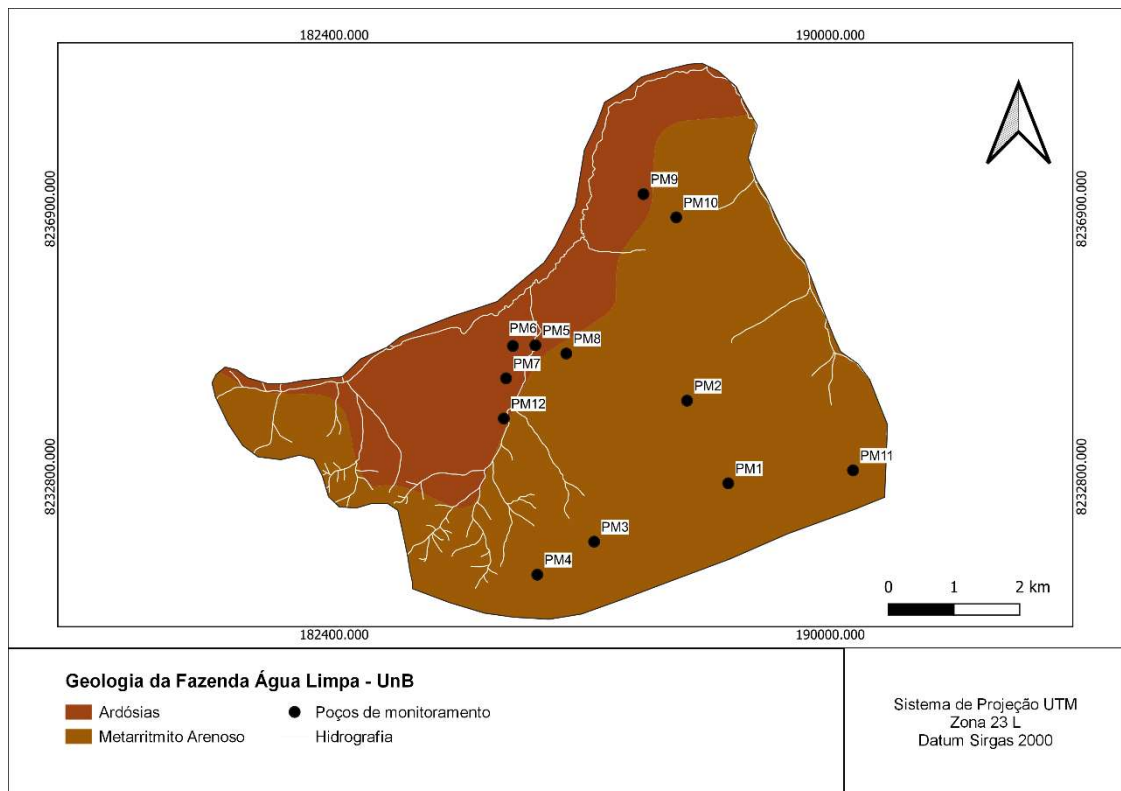
Fonte: Autoria própria

### 6.1.2 Geologia e Solo

No Distrito Federal e entorno há rochas pertencentes aos grupos Canastra, Paranoá, Bambuí e Araxá (Moraes e Campos, 2008; Campos, 2004). Estes grupos apresentam rochas com características semelhantes e agrupadas por unidades ou formações (Moraes e Campos, 2008).

A geologia da FAL, apresentada na figura 9, elaborada a partir dos dados vetoriais de Freitas-Silva e Campos (1998), aponta que a FAL pertence ao grupo geológico Paranoá, com ocorrência das unidades Ardósia (A) e Metarritmito Arenoso (R3/Q3).

**Figura 8 - Mapa de geologia da FAL.**



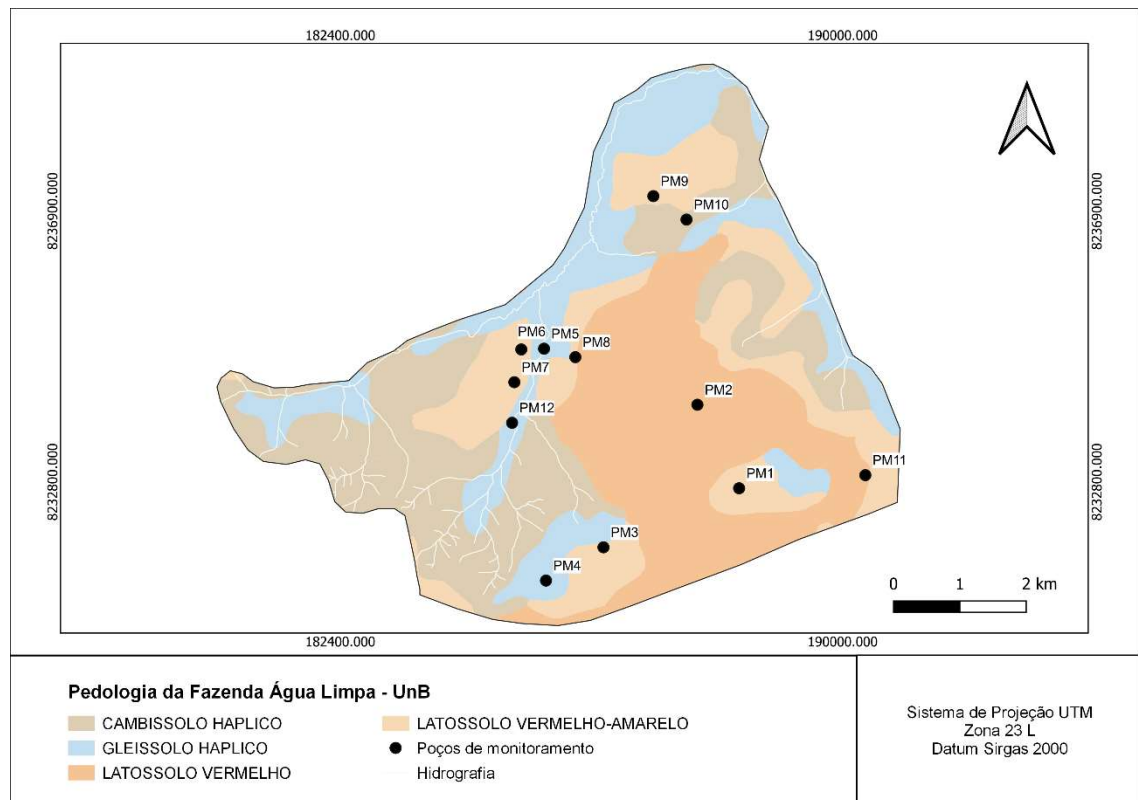
**Fonte: Autoria própria**

De acordo com Campos (2004) a unidade (A) das ardósias é constituída por um expressivo conjunto de ardósias roxas, homogêneas, dobradas, com forte clivagem ardosiana e com ocasionais lentes irregulares de quartzitos, que ocupam variadas posições estratigráficas. As ardósias são cinza escuro, quando frescas, e intensamente fraturadas em afloramentos.

E os metarritmitos da Unidade R3 são característicos de intercalações irregulares entre quartzitos finos, brancos e laminados por camadas de metassiltitos, metalamitos e metassiltitos argilosos cinzas escuros, e quando estão frescos, variam de tons rosados a avermelhados (Campos, 2004).

De acordo com o reconhecimento de solos realizado pela Embrapa e seus dados vetoriais disponibilizados (1978; 2008) o Distrito Federal apresenta as principais classes de solos do Cerrado brasileiro. A FAL apresenta principalmente o latossolo vermelho, latossolo vermelho-amarelo, cambissolo e gleissolo (Figura 10).

**Figura 9 - Mapa de pedologia da FAL.**



**Fonte: Autoria própria**

Os latossolos são divididos em latossolos vermelho e vermelho-amarelo, diferenciando-se pelo percentual de óxido de ferro que apresentam, o que influencia na coloração (IBGE, 2007; Santos *et al.*, 2013). São solos que apresentam elevada permeabilidade de água, com alta profundidade e homogêneos (Reatto *et al.*, 2004).

De acordo com Santos *et al.* (2013) os Cambissolos possuem elevada variação de profundidade, com perfis de espessura rasa à profunda. Além disso, podem ser pedregosos, cascalhentos e rochosos (Santos *et al.*, 2013; Reatto *et al.*, 2004).

Reatto *et al.* (2004) descrevem os gleissolos em função da predominância em áreas alagadas ou margens de rios. São solos com cores acinzentadas, azuladas ou esverdeadas. Todavia, podem ter alta ou baixa fertilidade natural e apresentam baixa capacidade de drenagem (Reatto *et al.*, 2004).

### 6.1.3 Hidrogeologia

De acordo com Campos (2004) o Distrito Federal é caracterizado por dois grupos de aquíferos, que correspondem ao Domínio Poroso e ao Domínio Fraturado. Os aquíferos de

domínio poroso ou intergranular ocupam os poros do solo. Ocorrem no manto de alteração das rochas e em materiais acumulados nos sistemas de drenagem (Lousada e Campos, 2005; Campos, 2004), com predomínio de aquíferos livres, podendo serem explorados por poços rasos (Zoby e Duarte, 2001).

Devido a variação de tipos litológicos há a divisão em sistemas (Tabela 1) P1, P2, P3 e P4 (Campos, 2004). Segundo Campos (2004) os sistemas P1, P2 e P3 são caracterizados por espessuras >5 m e condutividades hidráulicas variadas. Já o sistema P4 é marcado por espessuras <1 metro e condutividade hidráulica não elevada. Na Fal, ocorrem aquíferos porosos dos sistemas P1, P3 e P4.

**Tabela 1 - Características do domínio poroso no DF.**

<b>Sistemas</b>	<b>Subsistemas</b>	<b>Condutividade Hidráulica</b>	<b>Vazão dos poços (l/s)</b>	<b>Importância Hidrogeológica</b>	<b>Solos</b>
<b>P1</b>	Intergranulares, contínuos, livres e grande extensão lateral	Alta ( $2,8 \times 10^{-4}$ a $1,7 \times 10^{-5}$ (m/s))	< 800	Elevada	Latossolo Vermelho Amarelo (arenoso) e Neossolo Quartzarênico
<b>P2</b>	Intergranulares, contínuos, livres e grande distribuição lateral	Média ( $10^{-5}$ a $10^{-6}$ (m/s))	< 800	Mediana	Latossolo Vermelho Amarelo (argiloso)
<b>P3</b>	Intergranulares, descontínuos, livres e distribuição lateral ampla	Baixa ( $2,3 \times 10^{-6}$ a $1,4 \times 10^{-7}$ (m/s))	< 800	Pequena	Latossolo Vermelho Amarelo (argiloso) e Cambissolos
<b>P4</b>	Intergranulares, descontínuos, livres e muito restritos lateralmente	Muito Baixa ( $1,4 \times 10^{-7}$ (m/s))	< 800	Muito Pequena	Cambissolos

**Fonte: Campos e Freitas-Silva, 1998**

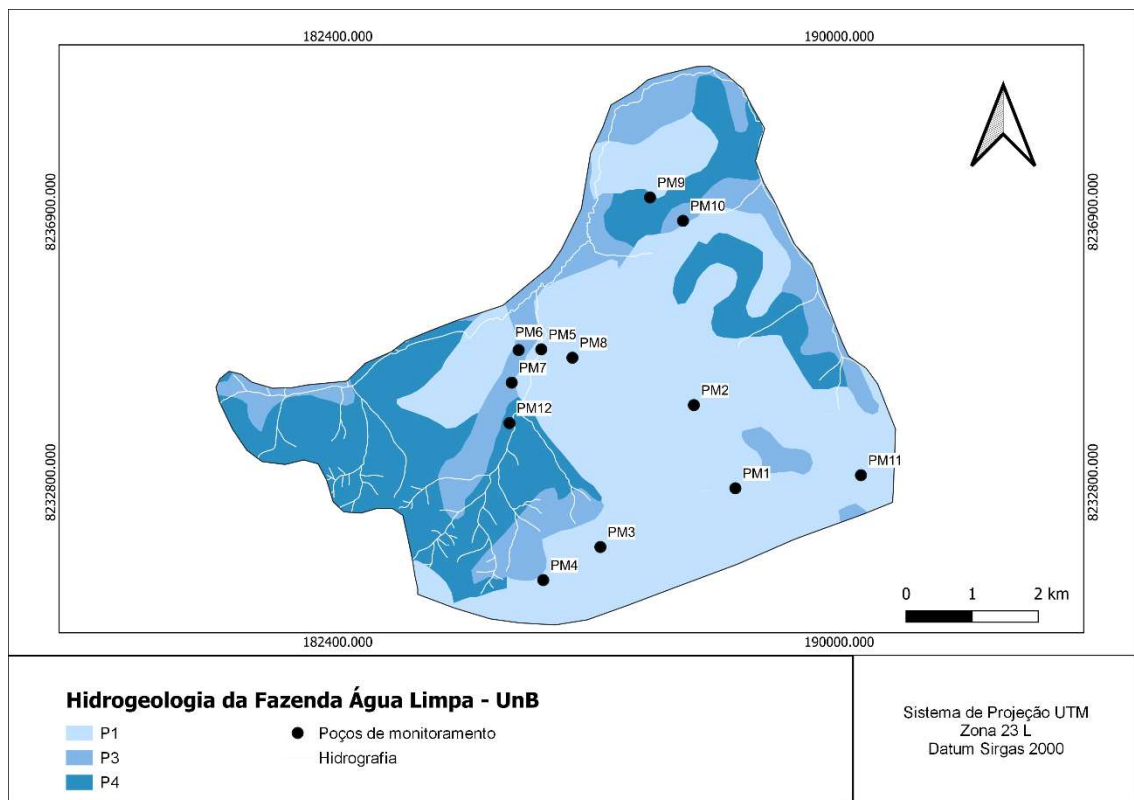
Os aquíferos fraturados são localizados entre fendas, fissuras, fraturas e falhas do meio rochoso (Lousada e Campos 2005). Devido às feições estruturais e vazões foi subdividido em

quatro sistemas aquíferos fraturados: Paranoá (subsistemas S/A; A; Q3/R3; R4 e PPC), Canastra (subsistemas F e F/Q/M), Araxá e Bambuí (Martins *et al.*, 2002).

A FAL apresenta uma hidrogeologia que é possível identificar aquíferos do domínio poroso e do domínio fraturado, predominantes na área do Distrito Federal (Campos 2004). Com relação ao domínio poroso, a área estudada apresenta os sistemas P1 (PM1, PM2, PM3, PM4, PM5, PM8 e PM11), sistema P3 (PM6, PM7 e PM10) e sistema P4 (PM9 e PM12), como apresentado na figura 11, elaborada a partir de dados vetoriais de Campos e Freitas-Silva, 1998.

Neste estudo, a abordagem foi restrita aos aquíferos do domínio poroso devido à importância que possuem para manutenção do escoamento de base nos períodos de estiagem e para a proteção e recarga de aquíferos profundos do domínio fraturado (Campos e Freitas-Silva, 1998).

**Figura 10 - Mapa de hidrogeologia da FAL.**



**Fonte: Autoria própria**

## 6.2. Metodologia

Com o objetivo de avaliar a aplicabilidade dos dados geofísicos de resistividade elétrica para a caracterização hidrogeológica em aquíferos porosos, realizou-se um estudo experimental

e de representação em SIGs de informações de campo. Os dados foram obtidos na FAL, por meio de levantamento geofísico com método elétrico do corrente contínua, além da aquisição de dados diretos nos poços de monitoramento (PM).

O trabalho ocorreu por meio de três etapas:

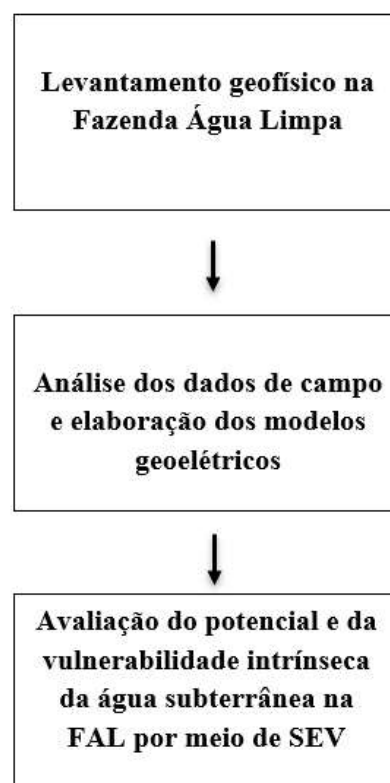
Etapa I: Levantamento geofísico na Fazenda Água Limpa (FAL/UnB);

Etapa II: Análise dos dados de campo e elaboração dos modelos geoeletricos; e

Etapa III: Avaliação do potencial e da vulnerabilidade intrínseca da água subterrânea na FAL por meio de SEV.

Por fim, os resultados foram discutidos com foco na avaliação da confiabilidade dos dados geofísicos e das possíveis implicações da caracterização geoeletrica para a gestão de recursos hídricos subterrâneos do Distrito Federal.

**Figura 11 - Fluxograma das etapas do trabalho.**



### **6.2.1 Histórico de aquisição de dados na FAL**

Para a execução deste estudo utilizou-se um conjunto de dados advindos de trabalhos realizados e/ou em andamento na FAL. Para os dados de medição de nível de água subterrânea

em campo, estimativa de recarga e dados litológicos, foram utilizados os dados dos poços de monitoramento que fazem parte da Tese de Doutorado em elaboração de Almeida (2020) que analisou o comportamento hidrológico do solo e a recarga em aquíferos porosos. A partir da existência desses poços foi possível fazer a relação com dados medidos em campo com os dados das SEVs e os resultados puderam ser gerados gradualmente.

Os trabalhos de Maciel *et al.* (2020) e Sousa *et al.* (2020) forneceram dados de resistividade elétrica a partir da Sondagem elétrica Vertical na FAL. A condutividade hidráulica do aquífero foi estimada, por meio de slug teste, baseada em analogias entre o comportamento elétrico e hidráulico do solo, relações empíricas entre parâmetros geolétricos, obtidos por meio de sondagem elétrica vertical (SEV), obtidos em De Almeida et al. (2021). Além de resultados das instalações hidrometeorológicas, experimentos e monitoramento apresentaram dados hidrológicos (quantitativos e qualitativos, superficiais e subterrâneos) que integraram o conjunto de dados disponíveis para a FAL, disponíveis por De Almeida et al. (2021).

### **6.2.2 Levantamento geofísico na Fazenda Água Limpa (FAL/UnB)**

Os dados de resistividade elétrica do solo foram obtidos por meio do método elétrico de corrente contínua com a aplicação da técnica de sondagem elétrica vertical (SEV) e do arranjo de Schlumberger. Quatro eletrodos (barras de aço inox com diâmetro de 3/16 polegadas e 50 cm de comprimento) foram dispostos na superfície do terreno em um mesmo alinhamento, sendo um par de eletrodos (AB), utilizado para induzir a corrente elétrica no subsolo, enquanto o outro par (MN) foi utilizado para medir a diferença de potencial que se estabelece, como resultado da indução da corrente.

Na execução da SEV, foi utilizado o equipamento resistímetro Geopulse (Figura 12), com o espaçamento máximo entre AB igual a 200 m, permitindo investigar uma profundidade teórica máxima de aproximadamente 50 m (AB/4), e espaçamento entre MN com variação de 0.4 a 12 m. Foram realizadas 11 SEVs durante a estação chuvosa (out/2019-jan/2020), em diferentes pontos de monitoramento (PMs) caracterizados predominantemente pela ocorrência de latossolos e de vegetação nativa do Cerrado (Figura 7). Simultaneamente, realizou-se a medição do nível de água (NA) subterrânea com um sensor elétrico em cada poço de monitoramento (Figura 13). O PM7 apresentou apenas dados de NA, pois problemas no equipamento Geopulse inviabilizaram a coleta de dados neste último ponto.

**Figura 12 - Equipamento resistímetro Geopulse e quatro eletrodos dispostos no mesmo alinhamento, com um par de eletrodos (AB) para induzir a corrente elétrica no subsolo e o outro par (MN) para medir a diferença de potencial da passagem da corrente.**





Fonte: Arquivo pessoal  
Registro: outubro/2019

Figura 13 - Medição de profundidade de nível da água do aquífero intergranular poroso com sensor.



Fonte: Arquivo pessoal  
Registro: outubro/2019

### 6.2.3 Análise dos dados de campo e elaboração dos modelos geoeletricos

O processamento dos dados de campo foi realizado por meio do programa gratuito IPI2WIN (Bobachev *et al.*, 1999), que permite plotar curvas logarítmicas da resistividade elétrica em função do espaçamento  $AB/2$ . Este programa é utilizado na inversão dos dados de campo, um procedimento para obter os valores médios de espessura e resistividade das principais camadas da subsuperfície.

Para isso, realiza-se o ajuste das curvas de campo com modelos de curvas teóricas existentes no programa. Esse é um processo de ajuste semiautomático de um modelo geoeletrico. Foram considerados satisfatórios os modelos que apresentaram MAPE (porcentagem de erro absoluto médio) inferior à 6% (Equação 11).

Além do processamento dos dados por meio do IPI2WIN, os modelos geoeletricos foram associados com a litologia descrita durante a perfuração dos poços de monitoramento e disponibilizada por De Almeida (2020), resultando em modelos geofísico-litológicos. Para o PM 12 não havia litologia disponível para a elaboração do modelo geofísico-litológico. O intuito dessa etapa do trabalho foi verificar a correspondência entre as camadas geoeletricas e as camadas do solo.

$$MAPE (\%) = 100 \times \frac{\sum_{i=1}^n \left( \ln \left( \frac{\rho_{a_{obs},i}}{\rho_{a_{cal},i}} \right) \right)^2}{n} \quad (11)$$

Sendo:

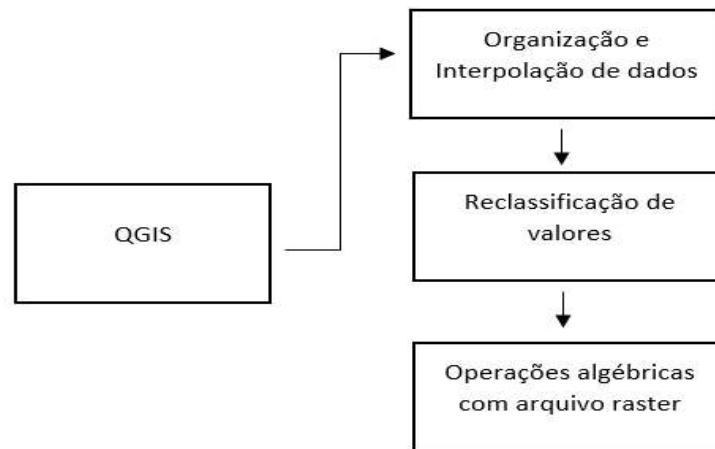
$\rho_{a_{obs}}$  = resistividade elétrica observada em campo

$\rho_{a_{cal}}$  = resistividade elétrica calculada pelo modelo

### 6.2.4 Elaboração de mapas temáticos

O processamento dos dados espaciais foi realizado por meio dos Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) com o software QGIS, versão 3.16, que possibilitou desenvolver as etapas descritas na Figura 14. Para o conjunto de dados obtidos em campo dos onze PMs, aplicou-se o método de interpolação de ponderação pelo inverso da distância (Inverse Distance Weighting - IDW) (Tabela2).

**Figura 14 - Etapas de processamento dos dados.**



**Fonte: Autoria própria**

Para o parâmetro da recarga antes de realizar a interpolação foi realizado o cálculo da recarga através da Equação 12 (Cutrim e Campos, 2010), a partir de dados do nível de água e da porosidade efetiva do aquífero da FAL, coletados a partir de medições durante um ano, disponibilizados por De Almeida (2020). Para a condutância, foi aplicado a Equação 9 (tópico 5.4) para os valores de espessura e resistividade das camadas em cada PM e realizado a interpolação. Os parâmetros hidráulicos foram estimados em campo, por meio do *slug test*, que monitora a oscilação do nível da água por um determinado tempo, calculado com base em Heigold *et al.* (1979).

$$R = h \cdot \eta e \tag{12}$$

As curvas de nível foram utilizadas para elaboração do Modelo Digital do Terreno (MDT), por meio das ferramentas *v.to.rast* e *r.surf.contour* do Qgis. Posteriormente, o MDT foi convertido para um mapa de declividade (%). Outro conjunto de dados espaciais encontrava-se disponível em formato vetorial, conforme listado na Tabela 2. Estes foram convertidos para o formato matricial por meio da ferramenta *v.to.rast* do Qgis, para possibilitar as operações entre as diferentes camadas de informação. Ao final, todas as camadas de entrada foram reprojctadas para padronização do tamanho dos pixels (10x10m).

Tabela 2 - Dados espaciais da FAL em formato vetorial.

<b>Camada de entrada</b>	<b>Fonte de dados</b>	<b>Tipo de processamento</b>
Pedologia	Vetor de solos do DF (Embrapa, 1978)	Conversão de vetor para matriz
Litologia	Vetor de hidrogeologia DF (Campos e Freitas-Silva, 1998)	Conversão de vetor para matriz
Hidrogeologia	Vetor de hidrogeologia DF (Campos e Freitas-Silva, 1998)	Conversão de vetor para matriz
Topografia	Vetor com curvas de nível do DF (Codeplan, 2013)	Elaboração do MDT e cálculo de declividade (%)
Uso e cobertura do solo	Vetor com as classes de cobertura do solo em 2019 (GEINFO/DIGEO/SINC/SEGETH, 2019)	Conversão de vetor para matriz
Profundidade do nível da água subterrânea	Monitoramento em campo (medição no NA)	Interpolação dos dados de campo
Resistividade elétrica do solo	Monitoramento em campo (SEV)	Interpolação dos dados de campo
Espessura das camadas do solo	Monitoramento em campo (SEV)	Interpolação dos dados de campo
Condutividade hidráulica	Monitoramento em campo (slug teste)	Interpolação dos dados de campo
Condutância longitudinal (S)	Estimativa de S a partir dos valores de resistividade elétrica e espessura das camadas da SEV	Interpolação dos dados de campo
Recarga	Estimativa da recarga com base nas medições de NA	Interpolação dos dados de campo

**Fonte: Autoria própria**

Após a obtenção das camadas de entrada com formato adequado, procedeu-se com a reclassificação dos arquivos matriciais (r.recode, Qgis) e realização das operações algébricas (calculadora raster, Qgis). Os valores dos rasters foram reclassificados para possibilitar a padronização dos valores utilizados nos índices de avaliação da vulnerabilidade e do potencial dos aquíferos. A reclassificação dos dados foi necessária por dois motivos: i) Para representação de variáveis categóricas em formato numérico (ex.: classe de solo e de uso e cobertura do solo, textura do solo, sistema aquífero); e ii) para a determinação das categorias representativas de cada camada de informação, que definem se determinada informação é mais ou menos importante durante as operações com a calculadora raster.

Por meio da organização e interpolação dos dados, reclassificação de valores e álgebra de mapas obtiveram-se os mapas de i) potencial de exploração de água subterrânea; ii) vulnerabilidade natural à contaminação do aquífero; e iii) indicação de áreas prioritárias para utilização da água subterrânea. Para obtenção deste último resultado, realizou-se a razão entre os mapas i e ii, após seleção dos mapas de potencial e vulnerabilidade mais representativos da

área de estudo. O desenvolvimento dos mapas de potencial e de vulnerabilidade consta nos itens a seguir.

### 6.2.5 Avaliação do potencial de águas subterrâneas na FAL

Após a construção dos modelos geoeletricos-litológicos, camadas com valores reduzidos de  $\rho$  foram classificadas como representativas da camada aquífera em cada PM. A profundidade do aquífero obtida por medição direta nos PM (NAobs) foi relacionada com a profundidade estimada na SEV (NAsev) com o intuito de verificar se a SEV possibilita a identificação adequada do nível da água (NA) em aquíferos porosos. Obtida uma relação significativa entre NAobs e NAsev, procedeu-se com a caracterização do comportamento das camadas não saturada (posicionada acima da camada geoeletrica com valor reduzido de  $\rho$ ), saturada (menor valor de  $\rho$  em comparação com demais camadas) e impermeável (posicionada abaixo da camada saturada), a partir dos valores de  $\rho$  e  $h$ .

Além disso, realizou-se a estimativa do potencial de exploração do aquífero poroso na FAL com base nas metodologias apresentadas por Gonçalves *et al.* (2009) e Hasan *et al.* (2017). Gonçalves *et al.* (2009) avaliaram a favorabilidade à exploração de água subterrânea no DF combinando informações de espessura da zona não saturada, de declividade, de uso e cobertura do solo e vazão média dos aquíferos. Desse modo, foram adotados os parâmetros e as categoriais adotadas em Gonçalves *et al.* (2009) para avaliação do potencial na FAL (Tabela 3).

Adicionalmente, avaliou-se o potencial de exploração a partir dos valores de  $\rho_{\text{aquifero}}$  e da combinação entre  $\rho_{\text{aquifero}}$ ,  $h_{\text{aquifero}}$  e  $h_{\text{vadosa}}$ , todos extraídos das SEVs. Admitiu-se, no primeiro caso, uma relação inversa entre o potencial de exploração dos aquíferos e os valores de  $\rho_{\text{aquifero}}$ , considerando a analogia entre o comportamento elétrico e hidráulico do meio poroso. Adicionalmente, foram incluídos valores de espessura do aquífero ( $h_{\text{aquifero}}$ ) e da camada não saturada acima do aquífero ( $h_{\text{vadosa}}$ ) como fatores importantes para garantir o rendimento hídrico dos aquíferos. Assim, quanto maiores os valores de  $h_{\text{vadosa}}$  e  $h_{\text{aquifero}}$  e menores os valores de  $\rho_{\text{aquifero}}$ , maiores os valores de potencial do aquífero (Hasan *et al.*, 2017).

Por fim, houve a padronização dos mapas obtidos conforme i) Gonçalves *et al.* (2009), ii) valores de  $1/\rho_{\text{aquifero}}$ ; e iii)  $h_{\text{vadosa}} * h_{\text{aquifero}} * 1/\rho_{\text{aquifero}}$ , para visualização dos resultados em cinco classes de potencial (muito baixo, baixo, moderado, alto e muito alto).

**Tabela 3 - Parâmetros e categoriais adotadas para avaliação do potencial na FAL.**

<b>Classe</b>	<b>Categoria</b>
Uso e cobertura do solo	
Preservada	6
Agropecuaria	4
Reflorestamento	4
Solo exposto	3
area urbana	2
Profundidade do NA (m)	
0 - 1.5	2
1.5 - 4.5	3
4.5 - 9	5
9 - 15	7
15 -20	9
> 20	10
Declividade (%)	
0-3 plano	10
3-8 suave ondulado	8
8-20 ondulado	6
20-45 forte ondulado	4
Vazão média do aquífero (L/h)	
P1: 800	10
P3: 500	5
P4: 300	1

**Fonte: Autoria própria**

### **6.2.6 Avaliação da vulnerabilidade intrínseca da água subterrânea na FAL**

Para avaliação da vulnerabilidade natural dos aquíferos, adotaram-se os métodos DRASTIC, GOD, GLSI e S. Os rasters gerados conforme item 6.2.3 possibilitaram calcular o índice DRASTIC, por meio da combinação das camadas “D” (Profundidade da zona não saturada); “R” (Recarga do aquífero); “A” (Material do aquífero); “S” (Tipo de solo); “T” (Topografia); “I” (Impacto da zona não saturada); “C” (Condutividade hidráulica) (Tabela 4). Nesse método, as categorias representativas de cada classe de informação são ponderadas por um peso, resultando em uma categoria ponderada. Para o GOD, apenas o valor da categoria é aplicado para as camadas “G” (grau de confinamento); “O” (litologia sobrejacente) e “D” (profundidade até o aquífero) (Tabela 5).

No GLSI, a partir dos dados coletados em campo de resistividade elétrica e espessura das camadas, foi aplicado a Equação 10 (tópico 5.4) para os valores de resistividade e espessura da camada acima do aquífero em cada PM. Após o cálculo do GLSI para cada PM, aplicou-se

a interpolação. Para o mapa de vulnerabilidade estimado com base em S, nenhum procedimento adicional foi aplicado além da interpolação, conforme anteriormente descrito.

**Tabela 4 - Valores de reclassificação do DRASTIC.**

<b>Classe</b>	<b>Categoria</b>	<b>Categoria ponderada</b>
Profundidade do nível da água (D) (m): Peso = 5		
0 - 1.5	10	50
1.5 - 4.5	9	45
4.5 - 9	7	35
9 - 15	5	25
15 - 20	3	15
> 20	2	10
Recarga (R) (mm/ ano): Peso = 4		
0 - 50	1	4
50 - 100	3	12
100 - 150	6	24
150 - 250	7	28
>250	9	36
Litologia (A): Peso = 3		
P1	3	9
P3	2	6
P4	1	3
Solo (S): Peso = 2		
1: Cambissolo	2	4
2: Solo hidromórfico	4	8
3: Latossolo vermelho	7	20
4: Latossolo vermelho-amarelo	7	20
Topografia (T) (%): Peso = 1		
0-3: plano	10	10
3-8: suave ondulado	8	8
8-20: ondulado	6	6
20-45: forte ondulado	4	4
Impacto (textura) da zona vadosa (I): Peso = 5		
1: argilosa com cascalho	1	5
2: argilosa	5	25
3: argila média (15- 35%)	10	50
Condutividade elétrica (C) (m/dia): Peso = 3		
1.00E+00	10	30
1.00E-01	5	15
1.00E-02	3	9
1.00E-03	1	3

**Fonte: Autoria própria**

**Tabela 5 - Valores de reclassificação do GOD.**

Classe	Categoria
Grau de confinamento (G)	
Livre	1
Litologia (O)	
P1	1
P3	0.7
P4	0.4
Profundidade (D)	
0 - 1.5	1
1.5 - 4.5	0.9
4.5 - 9	0.8
915	0.7
15 - 20	0.6
>20	0.5

**Fonte: Autoria própria**

Por fim, os mapas foram classificados em cinco classes de vulnerabilidade com a finalidade de possibilitar a comparação entre os resultados obtidos (Tabela 6). O mapa de vulnerabilidade intrínseca DRASTIC foi classificado em cinco classes de acordo com trabalhos de Neshat *et al.* (2014); Aller *et al.* (1987); Cutrim e Campos (2010) e Moura *et al.* (2016), estabelecendo uma escala de muito baixo a muito alto o potencial de contaminação. No método GOD e GLSI os resultados também foram classificados em cinco classes de susceptibilidade de acordo com valores de Oni *et al.* (2017) e George (2021). Para S, valores foram classificados conforme Braga (2016).

**Tabela 6 - Valor/classe de vulnerabilidade de cada método de vulnerabilidade.**

Classes DRASTIC (Cutrim e Campos, 2010)	Classes GLSI (George, 2021)	Classes S (Siemens) (Braga, 2016)	Classes GOD (George, 2021)	Classes de vulnerabilidade
< 120	< 1.0	> 3.0	< 0.1	Muito baixa
120 - 140	1.0 - 2.0	1.0 - 3.0	0.1 - 0.3	Baixa
140 - 180	2.0 - 3.0	0.3 - 1.0	0.3 - 0.5	Moderada
180 - 200	3.0 - 4.0	0.1 - 0.3	0.5 - 0.7	Alta
> 200	> 4	< 0.1	> 0.7	Muito Alta

**Fonte: Autoria própria**



### **6.2.7 Avaliação dos mapas de potencial e vulnerabilidade derivados dos dados geofísicos**

Para a análise do potencial de água foram comparados dados observados em campo (nível da água, condutividade hidráulica e transmissibilidade) com os resultados obtidos a partir das sondagens elétricas verticais. Além disso, mapas de potencial de exploração da água subterrânea derivados das SEV foram comparados com mapa elaborado a partir da metodologia apresentada por Gonçalves *et al.* (2009).

A confiabilidade dos resultados foi avaliada por meio da comparação entre os diferentes métodos de avaliação de vulnerabilidade. Os métodos tradicionais DRASTIC e GOD foram comparados com os métodos de condutância longitudinal e GLSI que utilizam o parâmetro geofísico da resistividade elétrica para quantificar as classes de vulnerabilidade na área.

## **7. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

A interpretação dos dados de resistividade elétrica ( $\rho$ ) e espessura ( $h$ ) das camadas do solo obtidos por meio da análise dos dados de SEV possibilitou caracterizar o comportamento geoeletrico do solo, isto é, identificar variações geoeletricas nas profundidades investigadas e entre os PMs estudados; utilizar o comportamento geoeletrico para diferenciar zonas com maior e menor potencial de águas subterrâneas no aquífero poroso localizado na FAL e mapear a vulnerabilidade natural à contaminação a partir da investigação indireta do aquífero.

### **7.1 Caracterização geoeletrica do solo na FAL**

Os valores de resistividade e de profundidade teórica de investigação ( $AB/2$ ) obtidos nas SEVs forneceram curvas de campo por meio das quais foram elaborados os modelos geoeletricos considerados satisfatórios, com erro de ajuste entre os dados de campo e do modelo inferior a 6% (Figura 15). Além disso, por meio da comparação visual, os modelos geoeletricos apresentaram correspondência com os dados litológicos, tanto com relação ao número de camadas quanto às espessuras, demonstrando a possibilidade de utilização da SEV para representação das variações litológicas.

Os modelos geoeletricos apresentaram entre 3 e 5 camadas, com valores de resistividade entre 800 e 40000  $\Omega.m$  e espessura das camadas entre 0.5 e 17 m (Tabela 7). Para a última camada de cada SEV considera-se espessura infinita em função da limitação do método em determinar tal medida. Em geral, as SEVs de todos os PMs apresentaram curvas modeladas com valores crescentes de resistividade para as camadas mais profundas, exceto para PM9 que apresentou redução no valor de resistividade elétrica para camadas mais profundas do solo. Em

função de semelhanças nas características das curvas resultantes da modelagem geoeétrica, os PM foram organizados em 3 grupos para a melhor análise das suas características.

**Tabela 7 - Resistividade e espessura das camadas do modelo geoeétrico e profundidade do nível da água subterrânea (NA).**

SEV	Latitude (°W)	Longitude (°S)	Elevação (m)	Resistividade (Ohm.m)					Espessura (m)				MAPE (%)
				<i>p1</i>	<i>p2</i>	<i>p3</i>	<i>p4</i>	<i>p5</i>	<i>h1</i>	<i>h2</i>	<i>h3</i>	<i>h4</i>	
PM 1	15°57.92	47°54.63	1174	9500	12500	4300*	22000	7000	0,50	1,50	8,00*	8,00	4,50
PM 2	15°57.23	47°54.97	1133	3400	24000	1600	1000*	3200	0,50	1,00	12,00	7,00*	4,80
PM 3	15°58.39	47°55.78	1194	8000	18500	4300	3100*	7500	0,50	1,50	1,50	12,00*	4,85
PM 4	15°58.65	47°56.27	1192	18000	13180	31400	3640*	30500	1,50	3,00	3,50	6,00*	5,95
PM 5	15°56.75	47°56.26	1073	2600	25000	2000*	2400	-	0,50	1,00	11,00*	-	4,30
PM 6	15°56.76	47°56.45	1070	40000	5500	2700*	4700	-	1,50	6,50	17,00*	-	4,40
PM 8	15°56.83	47°56.00	1074	1700	800*	2200	1000	3200	0,50	2,00*	5,00	9,00	5,10
PM 9	15°55.49	47°55.31	1067	7000	14000	3200	1400*	3500	0,50	2,00	9,50	8,00	5,95
PM 10	15°55.68	47°55.03	1071	24000	7500	4900*	6500	2200	1,50	1,50	7,00*	3,00	3,65
PM 11	15°57.87	47°53.50	1140	9000	15000	2500	1000*	3500	0,50	2,00	4,50	6,50*	4,20
PM 12	15°57.36	47°56.55	1092	4500	3300	1900*	5000	3800	1,00	4,00	5,00*	10,00	4,25

$\rho^*$  e  $h^*$  indica aquífero and aquífero, respectivamente.

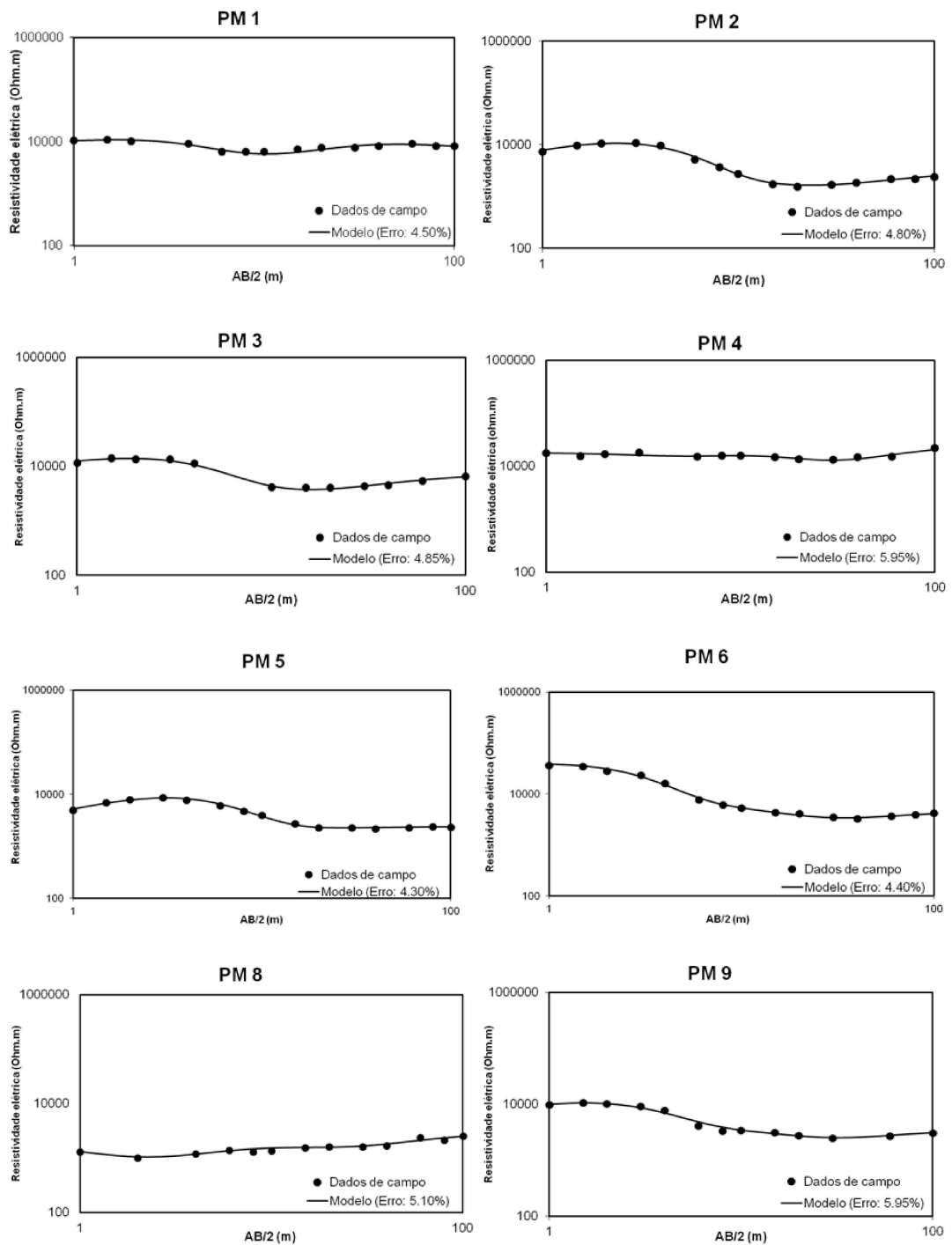
**Fonte: Autoria própria**

O grupo 1, composto por PM1, PM2, PM3, PM5, PM6, PM9 e PM11, apresentou padrão de curvatura semelhante, com valores de resistividade elevados na primeira camada, que gradualmente reduz na segunda camada e tende a subir a partir da terceira camada. Os PMs que compõem esse grupo têm como característica comum o tipo de solo, no caso o latossolo, exceto para PM5, que ocorre na transição entre latossolo e solo hidromórfico. Quanto à cobertura do solo, predomina o cerrado sensu strictu (PM2, PM9 e PM11), além da ocorrência de campo sujo (PM3) e eucalipto (PM1). Variações na cobertura do solo aparentemente não influenciaram o formato das curvas, porém, podem ter relação com a variação dos valores de resistividade.

O segundo grupo foi constituído pelos PMs 4, 8 e 12, caracterizados pela ocorrência de campo limpo, pastagem e mata de galeria, todos com ocorrência de solo hidromórfico. Apesar de apresentarem maiores diferenças nos valores de resistividade elétrica, os modelos geoeétricos de PM8 e PM12 demonstraram reduzida variação de resistividade no perfil de solo, exceto pelas camadas mais profundas com elevada resistividade para PM 4. Por se diferenciar dos demais PMs, quanto ao formato da curva do modelo ser mais linear e com menos oscilações,

PM10 compõe o terceiro grupo. Com ocorrência de cambissolo e vegetação do tipo campo sujo, PM10 apresentou curva com tendência gradualmente decrescente dos valores de resistividade.

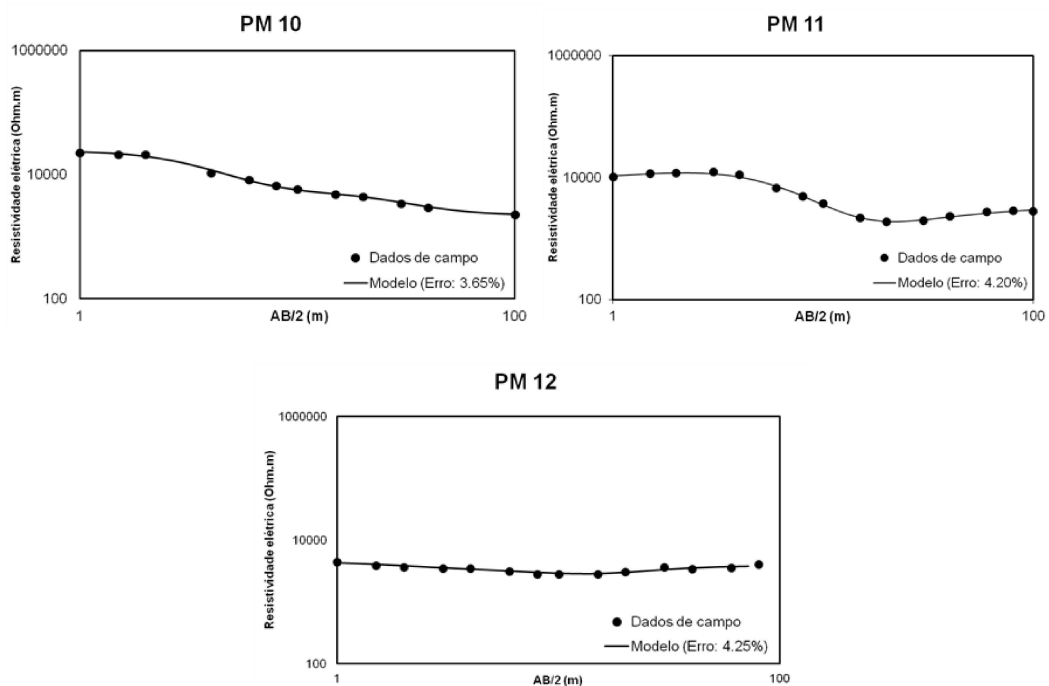
**Figura 15 - Curvas de campo e do modelo do PM1 ao PM9, com seus respectivos valores de resistividade elétrica (Ohm.m) e AB/2 (m).**



Fonte: Autoria própria

O grupo 1 inclui PMs que ocorrem em solo com semelhanças quanto à textura, com material argilo arenoso, mas com variações entre amarelo, vermelho e com cascalho. Já no grupo 2 apresentou principalmente solo franco argiloso, siltoso e arenoso. PM10, por sua vez, apresentou camadas de solo argilo arenosa e siltosa. Infere-se que as curvas que apresentaram comportamento semelhante são representativas de material semelhante quanto à litologia (Shiraiwa *et al.*, 2010).

**Figura 15 - Curvas de campo e do modelo do PM10 ao PM12, com seus respectivos valores de resistividade elétrica (Ohm.m) e AB/2 (m).**



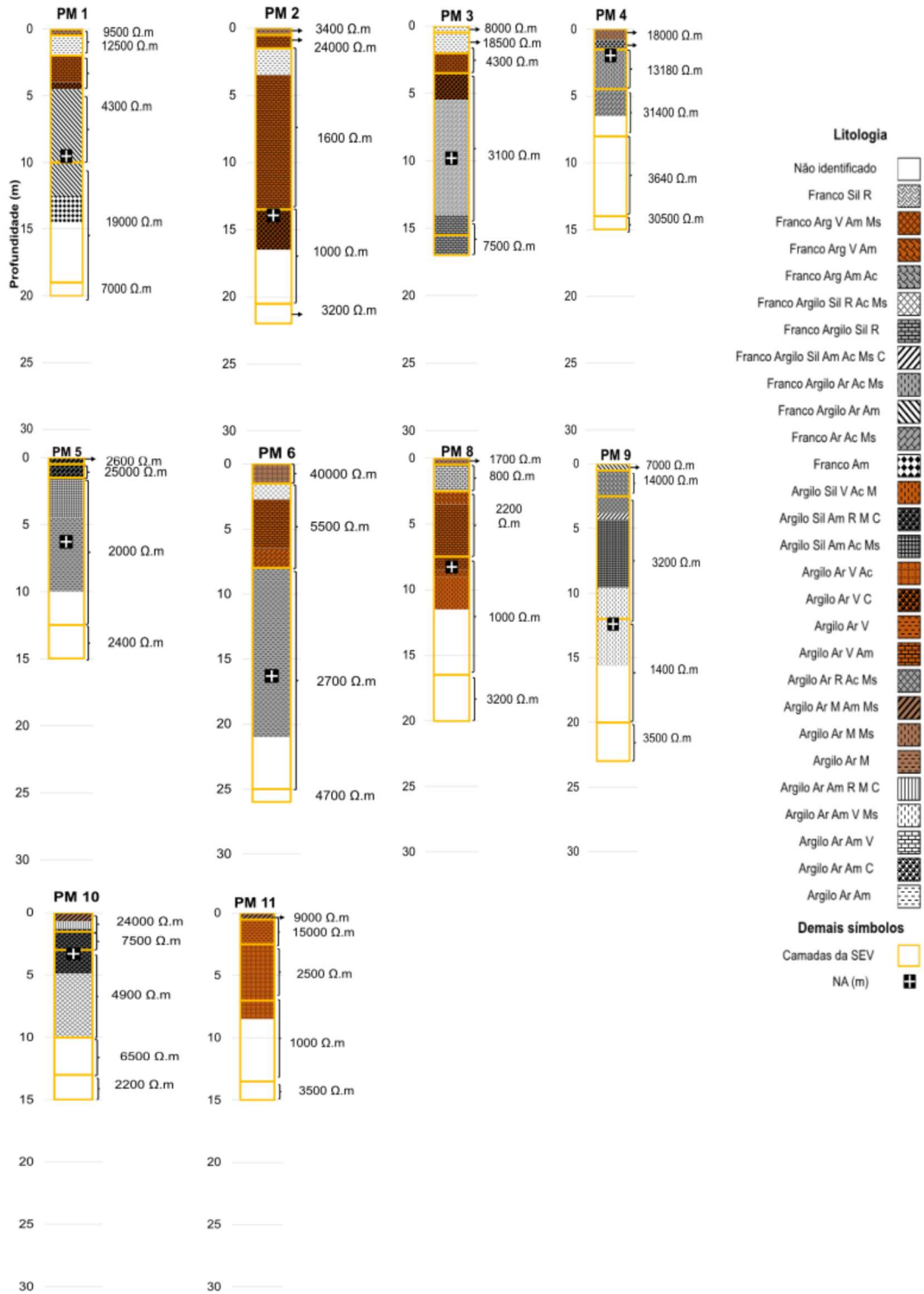
**Fonte: Autoria própria**

Parte dos modelos geofísicos-litológicos apresenta regiões em branco nas últimas camadas. Isso se deve ao fato de só ter informação litológica até o fundo dos poços de monitoramento de água subterrânea. Como algumas SEVs atingiram profundidades maiores que o fundo dos poços, denominaram-se as áreas em branco como regiões não classificadas, pois não há conhecimento do que há abaixo de determinadas profundidades. Para o PM 12 não havia litologia disponível para a elaboração do modelo geofísico-litológico.

Apesar das camadas litológicas com espessura inferior a 50 cm serem agrupadas no modelo geoeletrico, a exemplo do PM4, de modo geral, os modelos geofísico-litológicos resultantes da comparação entre os modelos geoeletricos e a descrição litológica realizada em

campo evidenciaram a correspondência das camadas do solo determinadas em ambos os métodos (Figura 16).

**Figura 16 - Modelos litológicos com os valores de espessura (m) de cada camada e resistividade elétrica (Ohm.m).**



Fonte: Adaptado De Almeida *et al.* (2021)

## 7.2 Análise de potencial de água subterrânea

Houve uma relação linear significativa entre os dados de profundidade do nível de água identificados nos modelos geofísico-litológicos (NAsev) e os dados do nível de água observados em cada ponto de monitoramento (NAobs) (Tabela 8, Figura 17,  $R^2 > 0,5$ ). O nível da água (NA) medido nos poços foi posicionado na maior parte das vezes na camada menos resistiva. Assim, observou-se que os dados resultantes da SEV podem ser úteis para estimar a profundidade do nível de água em aquíferos porosos com características semelhantes às apresentadas neste estudo.

**Tabela 8 - Parâmetros geoeletricos (haquífero = espessura do aquífero, paquífero = resistividade do aquífero,  $\rho_w$  = resistividade da água no aquífero, S = condutância longitudinal, R = resistência transversa, F = fator de formação.**

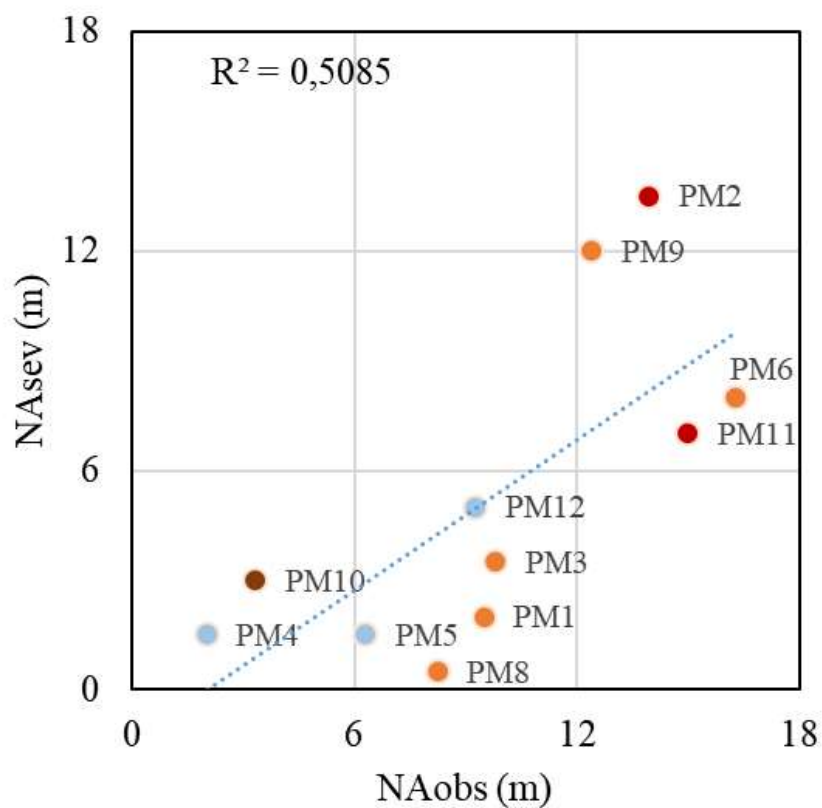
SEV	haquífero (m)	$\rho_{\text{aquífero}}$ (ohm.m)	$\rho_{\text{água}}$ (ohm.m)	Dar Zarrouk		F ( $\rho_{\text{aquífero}} / \rho_{\text{água}}$ )
				S (Seimens)	R (Ohm.m <sup>2</sup> )	
PM 1	8,00	4300	1088,139	0,001	34400	3,952
PM 2	7,00	1000	1250,000	0,010	7000	0,800
PM 3	12,00	3100	1540,832	0,001	37200	2,012
PM 4	6,00	3600	1175,088	0,000	39540	3,063
PM 5	11,00	2000	446,429	0,008	22000	4,480
PM 6	17,00	2700	1083,424	0,005	45900	2,492
PM 8	9,00	1000	975,610	0,004	9000	1,025
PM 9	8,00	1400	954,198	0,007	11200	1,467
PM 10	7,00	4900	2801,120	0,004	34300	1,749
PM 11	6,50	1000	1464,129	0,009	6500	0,683
PM 12	5,00	1900	378,788	0,004	9500	5,016

**Fonte: Autoria própria**

Ainda com relação à identificação do nível da água subterrânea, nos PMs 2, 4, 8, 9 e 10 a transição das camadas com valor elevado de resistividade para camadas com reduzida resistividade foi aproximada à posição do lençol freático (Tabela 7). Nos demais PMs, apesar da SEV não indicar a profundidade exata do NA, o lençol freático foi posicionado em camadas com reduzida resistividade elétrica (Figura 18). As camadas com resistividade reduzida e coincidentes com a posição do nível da água (NA) observado em campo foram definidas como representativas do aquífero em cada poço de monitoramento.

Desse modo, foram atribuídos aos aquíferos os seguintes valores de resistividade elétrica: PM1 = 4300  $\Omega$ .m, PM2 = 1000  $\Omega$ .m, PM3 = 3100  $\Omega$ .m, PM4 = 3640, PM5= 2000  $\Omega$ .m, PM6= 2700  $\Omega$ .m, PM8 = 1000  $\Omega$ .m, PM9 = 1400  $\Omega$ .m, PM10 = 4900  $\Omega$ .m, PM11= 1000, PM12= 1900  $\Omega$ .m. Sendo majoritariamente representativa das menores resistividades de cada PM. Esse comportamento pode acontecer devido a resistividade mínima estar relacionada com a posição do lençol freático (Martins *et al.*, 2008).

**Figura 17 - Modelo de regressão da relação do nível da água medido em campo com o nível da água obtido pela SEV (A cor dos pontos indicam o tipo de solo. Ponto vermelho: Latossolo vermelho; laranja: Latossolo vermelho amarelo; marrom: Cambissolo; azul: Gleissolo)**



**Fonte: Autoria própria**

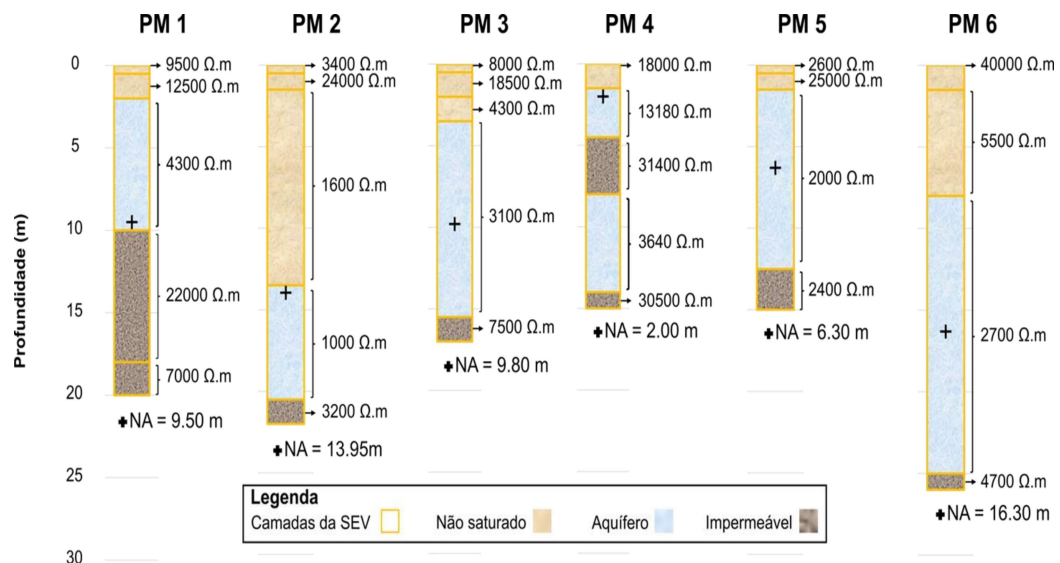
Para o aquífero do PM11 foi atribuído valor de resistividade elétrica igual à 1000  $\Omega$ .m. Contudo, como o poço permaneceu seco durante a estação chuvosa, não foi possível identificar se houve relação entre a camada geoeletrica pouco resistiva e a formação aquífera em PM11.

Desse modo, os modelos geoeletricos possibilitaram classificar a subsuperfície como não saturada, onde os poros do solo são preenchidos com ar e água; saturada, que se refere ao aquífero; e impermeável, que é a zona de resistividade elevada em comparação com o aquífero, sendo responsável por manter a água no aquífero (Figura 18).

Para facilitar a interpretação dos resultados, a organização dos PMs por grupos considerando as semelhanças apresentadas nos modelos geoeletricos foi mantida na apresentação desses resultados. No grupo 1, PM1, PM2, PM3, PM5, PM6, PM9 e PM11 apresentaram valores de resistividade entre 1000  $\Omega$ .m e 25000  $\Omega$ .m, com valores iniciais reduzidos na primeira camada, com aumento na camada seguinte e diminuição na zona saturada.

No grupo 2, PM4, PM8 e PM12 apresentaram os valores nas zonas não saturada de 800  $\Omega$ .m a 18000  $\Omega$ .m, na zona saturada 1000  $\Omega$ .m a 13180  $\Omega$ .m e na camada impermeável 3200  $\Omega$ .m a 31400  $\Omega$ .m, sendo os valores mais altos representativos do PM 4. O grupo 3 (PM10), apresentou medições da resistividade que variaram entre 4900  $\Omega$ .m e 24000  $\Omega$ .m, iniciando em valores elevados na zona não saturada e em seguida apresentaram uma tendência a diminuir conforme se aproximava do aquífero.

**Figura 18 - Modelos geoeletricos com os valores de profundidade (m) e resistividade elétrica (Ohm.m) de cada camada.**



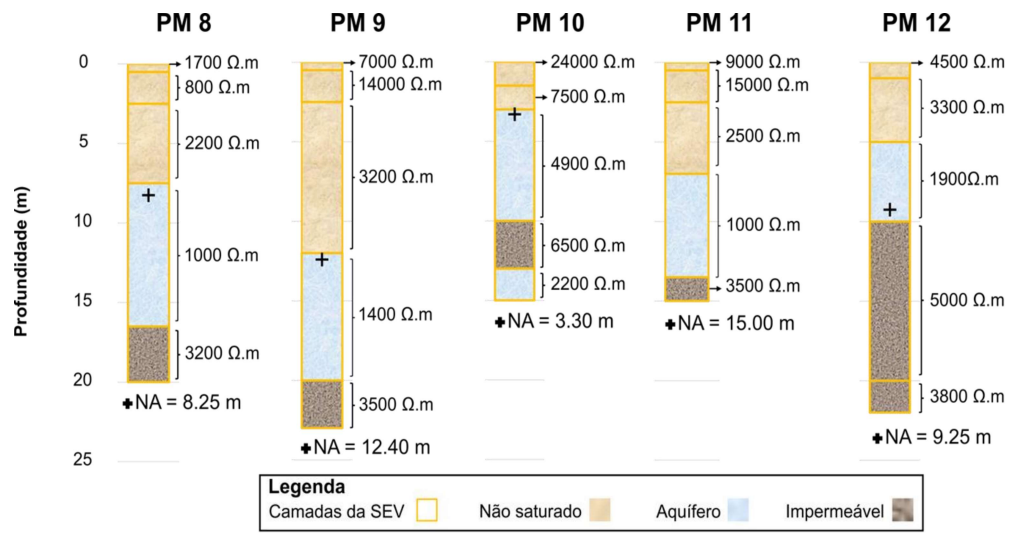
Fonte: Adaptado de Sousa *et al.* (2020)

Os parâmetros hidráulicos da FAL foram analisados por De Almeida *et al.* (2021) que verificaram que existe uma significativa relação ( $R^2$  maior que 0.5), entre os valores de K e T medidos em campo, com os valores de K e T estimados a partir da resistividade elétrica e do fator de formação do aquífero (Tabela 9). A validação foi por meio de modelos de regressão,



em que K medido em campo foi definido de acordo com Heigold *et al.* (1979) e T medido em campo de acordo com Niwas e Singhal (1981).

**Figura 18 - Modelos geoeletricos com os valores de profundidade (m) e resistividade elétrica (Ohm.m) de cada camada.**



Fonte: Adaptado de Sousa *et al.* (2020)

**Tabela 9 - Parâmetros hidráulicos obtidos em campo e estimados a partir das relações empíricas propostas com dados de SEV (K= condutividade hidráulica e T= Transmissibilidade hidráulica).**

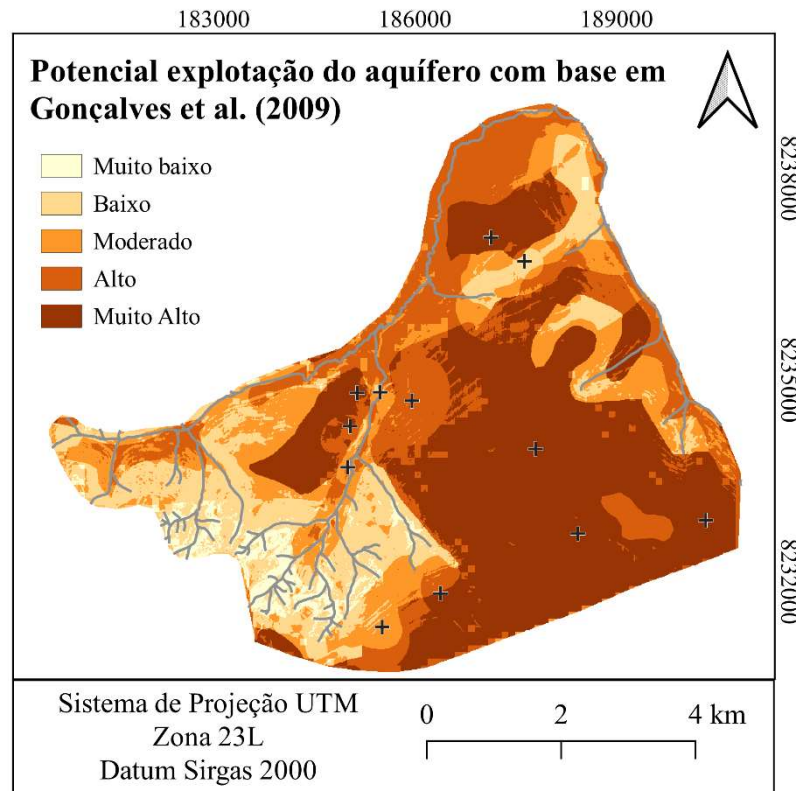
SEV	$K_{obs}$ (m/dia)	Kest a partir de aquífero (m/dia)	Kest a partir de F (m/dia)	Tobs (m <sup>2</sup> /dia)	Test a partir de aquífero (m <sup>2</sup> /dia)
PM 1	0,3074	0,2822	0,2594	2,2871	1,4495
PM 2	0,3093	0,3482	0,3448	1,1270	1,7795
PM 3	-	0,3062	0,3120	-	1,5695
PM 4	0,0540	0,1046	0,0625	0,2500	0,5615
PM 5	-	0,3282	0,2451	-	1,6795
PM 6	-	0,3142	0,2990	-	1,6095
PM 8	-	0,3482	0,3387	-	1,7795
PM 9	0,4150	0,3402	0,3267	2,8800	1,7395
PM 10	0,1809	0,2702	0,3191	1,1109	1,3895
PM 11	0,3904	0,3482	0,3480	1,4954	1,7795
PM 12	0,2342	0,3302	0,2306	0,9042	1,6895

Fonte: Adaptado De Almeida *et al.* (2021)

Além da identificação das camadas não saturada e saturada do solo e dos parâmetros hidráulicos do aquífero a partir de SEV, observou-se a possibilidade de utilização dos dados geolétricos para o mapeamento do potencial de exploração do aquífero poroso na FAL (Figuras 19, 20 e 21). Conforme o método apresentado por Gonçalves *et al.* (2009), a maior parte da área da FAL (superior à 18%) apresenta aquífero com potencial de exploração classificado como muito alto (Figura 19). Esse resultado difere do padrão apresentado em Gonçalves *et al.* (2009), com parte significativa do território do DF indicando aquíferos pouco ou não favoráveis ao uso.

Além da vazão reduzida em comparação com aquíferos profundos, o domínio poroso é sensível às alterações da cobertura do solo que podem impactar a recarga. Há evidências de que a substituição da cobertura nativa do solo pelo eucalipto, por exemplo, intensifica as perdas de água devido à alta demanda transpirativa (Liu *et al.*, 2017; Silva *et al.*, 2020) e/ou a capacidade de reduzir a taxa de infiltração da água da chuva, uma propriedade descrita como repelência à água (Rieger *et al.*, 2016; Zavala *et al.*, 2014). Logo, a FAL difere do cenário predominante no DF, com predomínio da cobertura nativa de Cerrado em área de preservação permanente.

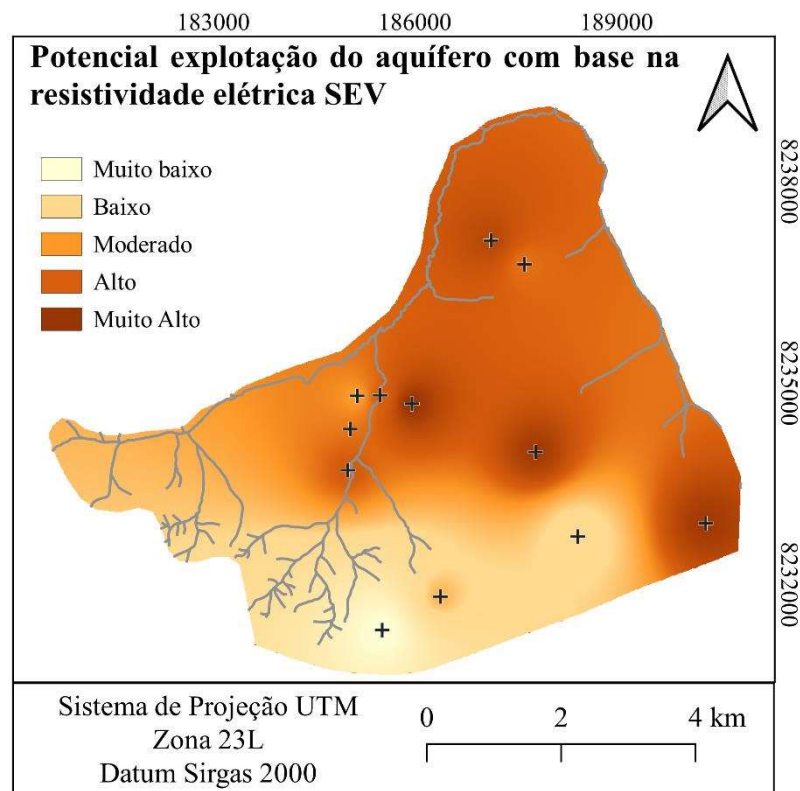
**Figura 19 - Potencial de exploração do aquífero da FAL com base em Gonçalves et al. (2009).**



**Fonte: Autoria própria**

A comparação visual entre o mapa obtido conforme Gonçalves *et al.* (2009) e aqueles derivados das SEV (Figuras 20 e 21) indicam correspondência com relação às áreas definidas como de potencial muito alto, alto, moderado, baixo e muito baixo. Os valores de resistividade elétrica do aquífero indicam maior potencial na porção leste da FAL, correspondendo às zonas menos resistivas, com predomínio de latossolos. De acordo com a literatura, é possível que as áreas menos resistivas indiquem áreas com maior porosidade, capazes de armazenar maiores volumes de água (Hasan *et al.*, 2017). Ao considerarmos a porosidade como aproximadamente  $1/F$ , é possível verificar que áreas com valores menos elevados no mapa de iso-resistividade do aquífero (Figura 20) apresentam valores mais elevados de  $1/F$ , conforme Tabela 8.

**Figura 20 - Potencial de exploração do aquífero da FAL com base na resistividade elétrica.**

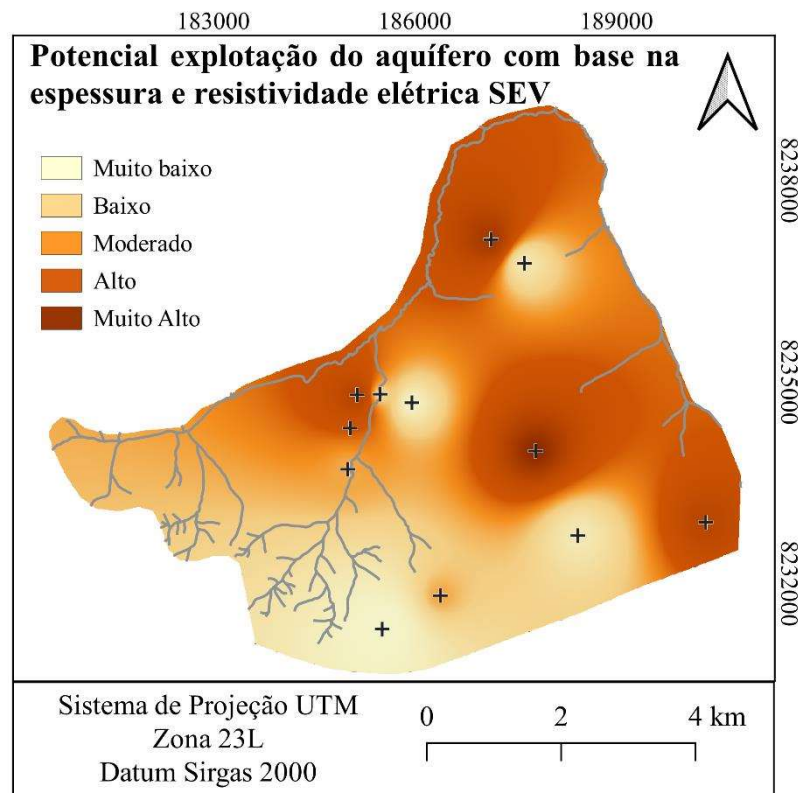


**Fonte: Autoria própria**

Ao considerar o efeito da espessura das zonas não saturada e saturada, derivadas dos modelos geoeletricos (Figuras 16 e 18), a delimitação das zonas de maior potencial de exploração torna-se mais aproximada ao mapa conforme Gonçalves *et al.* (2009), com erro absoluto percentual de aproximadamente 17% na comparação entre ambos (Tabela 10). Zonas não saturadas espessas retardam a recarga do aquífero, mas também regulam a perda de água

por evapotranspiração. Por isso, considerou-se que zonas não saturadas com espessura entre 15 e 20 metros podem favorecer a ocorrência de aquíferos produtivos. Adicionalmente, a espessura da camada saturada é um fator importante para a produtividade do aquífero, pois quanto maior a zona saturada, maior a capacidade de armazenamento e liberação de água, desde que o material do aquífero apresente valores elevados de condutividade hidráulica.

**Figura 21 - Potencial de exploração do aquífero da FAL com base na espessura e resistividade elétrica.**



**Fonte: Autoria própria**

**Tabela 10 - Percentual da área da FAL atribuído a cada classe de potencial de exploração do aquífero.**

Classes de potencial	Gonçalves <i>et al.</i> (2009)	$h * \text{aquifer} * (1/\rho)$	$\rho$
Baixo	1.630	5.768	8.255
Muito baixo	7.336	5.380	9.433
Moderado	7.413	11.031	8.897
Alto	9.448	10.763	8.864
Muito alto	18.020	11.343	8.871
Erro percentual total com relação à Gonçalves <i>et al.</i> (2009)		17.700	19.930

**Fonte: Autoria própria**

### 7.3 Análise de vulnerabilidade de água subterrânea

Para gerar o mapa do DRASTIC foi realizado o somatório dos sete parâmetros físicos, usados para avaliar a vulnerabilidade intrínseca da água subterrânea (Figura 22). Os dados vetoriais encontravam-se disponíveis para a área de estudo. Com exceção dos dados de recarga que foram estimados conforme Cutrim e Campos (2010) e posteriormente interpolados para a FAL, apresentaram variação entre 99 e 789 mm/ano (Tabela 11). Dados de profundidade e condutividade hidráulica do aquífero, também provenientes da interpolação dos dados de campo, apresentaram predomínio de valores superiores à 20 m e 0.30 m/dia, respectivamente.

**Tabela 11 - Cálculo do parâmetro da recarga.**

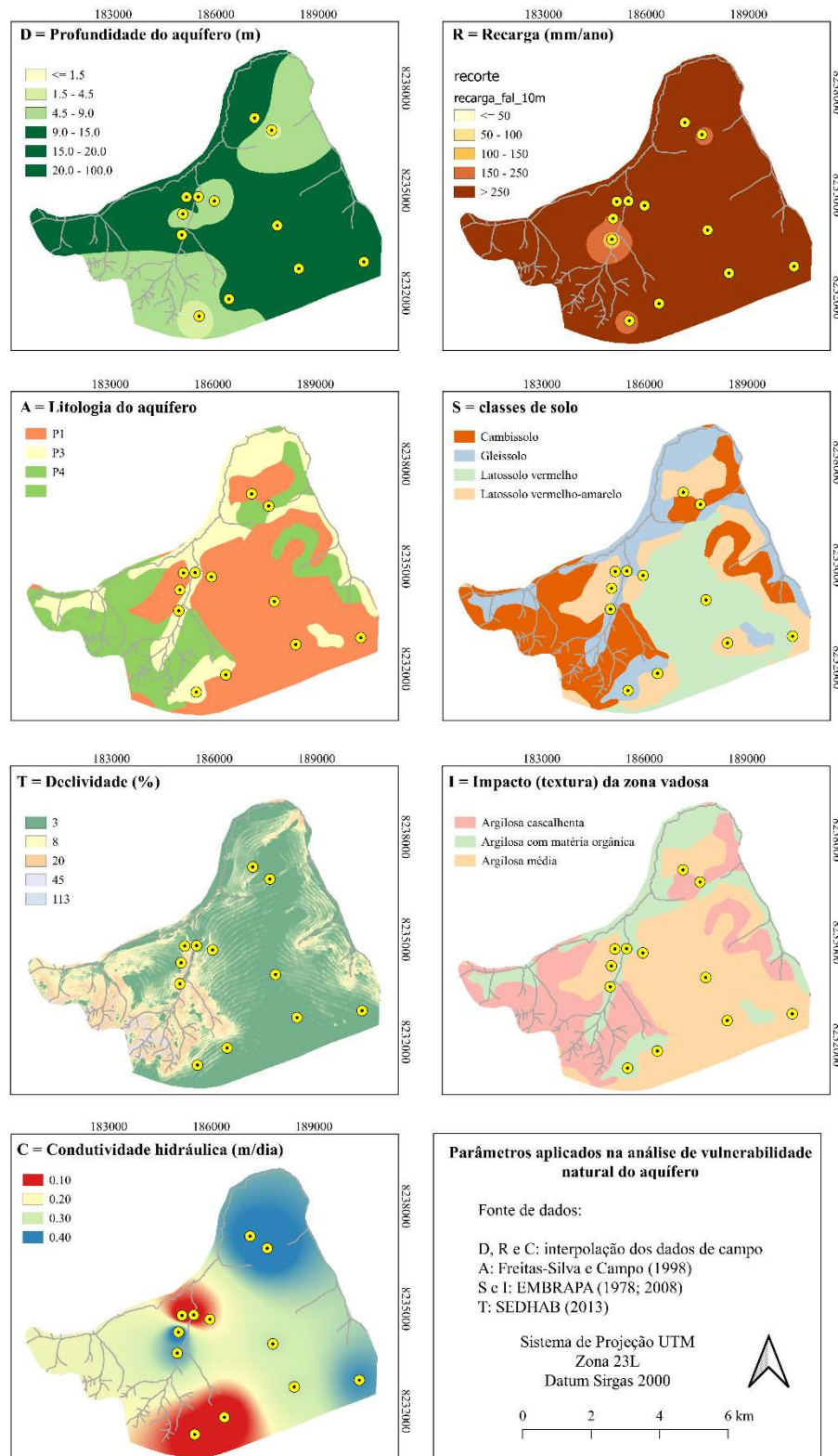
PM	NAmin (m)	NAmax (m)	Varição NA 2019 (h = NAmax - NAmin) (m)	Porosidade efetiva <sup>1</sup> (n) (adimensional)	Recarga (R = h x n) (mm/ano)
PM1	11.85	7.80	4.05	0.10	405.00
PM2	15.30	10.06	5.24	0.10	524.00
PM3	11.00	4.07	6.93	0.10	693.00
PM4	4.40	0.37	4.03	0.05	201.50
PM5	6.30	2.36	3.94	0.05	197.00
PM6	16.79	8.90	7.89	0.10	789.00
PM7	6.55	0.41	6.14	0.03	184.20
PM8	9.80	4.61	5.19	0.05	259.50
PM9	13.20	6.91	6.29	0.10	629.00
PM10	9.00	2.67	6.33	0.03	189.90
PM11	8.40	4.89	3.51	0.10	351.00
PM12	10.13	8.14	1.99	0.05	99.50

<sup>1</sup>Souza e Campos (2001); Távora (2010); Campos *et al* (2010); Mello e Castro (2011)

**Fonte: Autoria própria**

A combinação das camadas de informação resultou no mapa de vulnerabilidade DRASTIC, que é apresentado na figura 23, com 33,465 % da área do aquífero livre classificada com vulnerabilidade moderada, 25,551 % com alta vulnerabilidade e 20,902% com baixa vulnerabilidade (Tabela 12). A classe moderada e alta foram associadas principalmente ao Latossolo, predominante no sistema aquífero P1 do domínio poroso, representativo de elevada condutividade hidráulica ( $2,8 \times 10^{-4}$  a  $1,7 \times 10^{-5}$  m/s), conforme Freitas-Silva e Campos (1998). A área de baixa vulnerabilidade está contida majoritariamente no cambissolo e no solo hidromórfico, como parte do sistema P3 e P4 do domínio poroso, que são característicos de condutividade hidráulica baixa e muito baixa.

Figura 22 - Parâmetros aplicados na análise da vulnerabilidade.

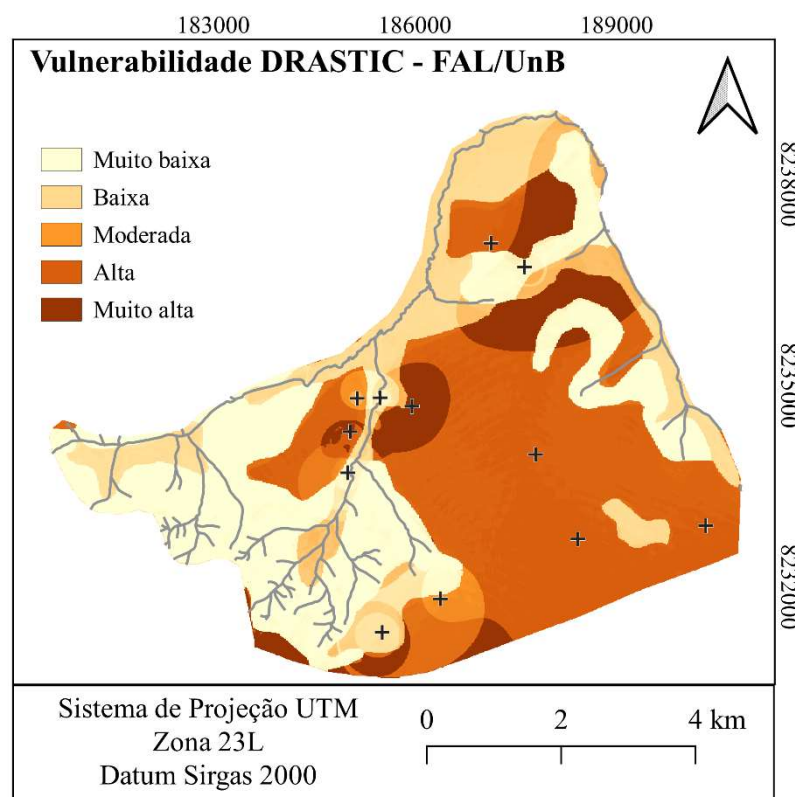


Fonte: Autoria própria

A quantidade de água que atinge o aquífero é um fator primordial, pois viabiliza o transporte de poluentes (Francisco *et al.*, 2019). E as áreas com valores de recarga elevados são

as mais susceptíveis a contaminação (Yakoub e Azzedine, 2019). Em áreas planas, como predominantemente na área de estudo, e com solos permeáveis, a recarga é ainda mais importante para contaminação do aquífero. Por isso, o fator recarga recebeu maior peso, comparado à declividade na composição do índice DRASTIC. Ainda assim, deve-se considerar que topografia influencia a capacidade de infiltração e a velocidade de propagação do poluente. Logo, as áreas menos inclinadas são mais susceptíveis a serem contaminadas (Yakoub e Azzedine, 2019).

**Figura 23 - Mapa de vulnerabilidade do método DRASTIC.**



**Fonte: Autoria própria**

No método GOD (Figura 24) o mapa de vulnerabilidade resultou da combinação das camadas de litologia (equivalente à camada A, impacto da zona vadosa, do método DRASTIC, Figura 23) e profundidade do NA (equivalente à camada D, profundidade NA, do método DRASTIC, Figura 23) com o grau de confinamento constante igual a 1 para toda a área de estudo, representando o aquífero livre.

A maioria da área (45,546%) apresentou alta vulnerabilidade natural à contaminação, nos mesmos locais que no DRASTIC (contida em latossolo e no sistema P1 do domínio poroso), e (30,592%) com moderada vulnerabilidade (Tabela 12). É possível que diferenças com relação

às classes de vulnerabilidade definidas pelos métodos DRASTIC e GOD resultaram da utilização de um número inferior de parâmetros em comparação com o DRASTIC, ou seja, o GOD considera menos parâmetros em sua avaliação.

A exemplo disso, Oliveira (2019) realizou a avaliação de vulnerabilidade natural de aquíferos e de análises espaciais sobre os postos de abastecimento de combustíveis e os poços de captação de água subterrânea no Conjunto Urbanístico de Brasília (CUB), por meio do DRASTIC e GOD. E constatou-se que mesmo com o GOD considerando menos parâmetros é passível de determinar a vulnerabilidade à contaminação de maneira significativa.

O método GOD dá maior importância às propriedades inerentes ao material litológico de acordo com a distribuição granulométrica, grau de compactação e consolidação (Oni *et al.*, 2017; George, 2021). O efeito da litologia e da espessura da camada na avaliação da vulnerabilidade do aquífero é de grande importância, pois camadas menos espessas acima do aquífero podem influenciar, facilitando o tempo de deslocamento dos contaminantes até o aquífero (Oni *et al.*, 2017).

**Tabela 12 - Percentual de extensão de área atribuída à cada classe de vulnerabilidade com relação à área total da FAL.**

<b>Área (%) atribuída à cada classe de vulnerabilidade com relação à área total da FAL (44.31 Km<sup>2</sup>)</b>				
<b>Classes</b>	<b>DRASTIC</b>	<b>GOD</b>	<b>S</b>	<b>GLSI</b>
Muito baixa	19,934	0,000	0,425	0,017
Baixa	20,902	12,639	73,380	24,018
Moderada	33,465	30,592	10,348	22,708
Alta	25,551	45,546	6,056	27,984
Muito Alta	0,001	11,129	2,350	25,291

**Fonte: Autoria própria**

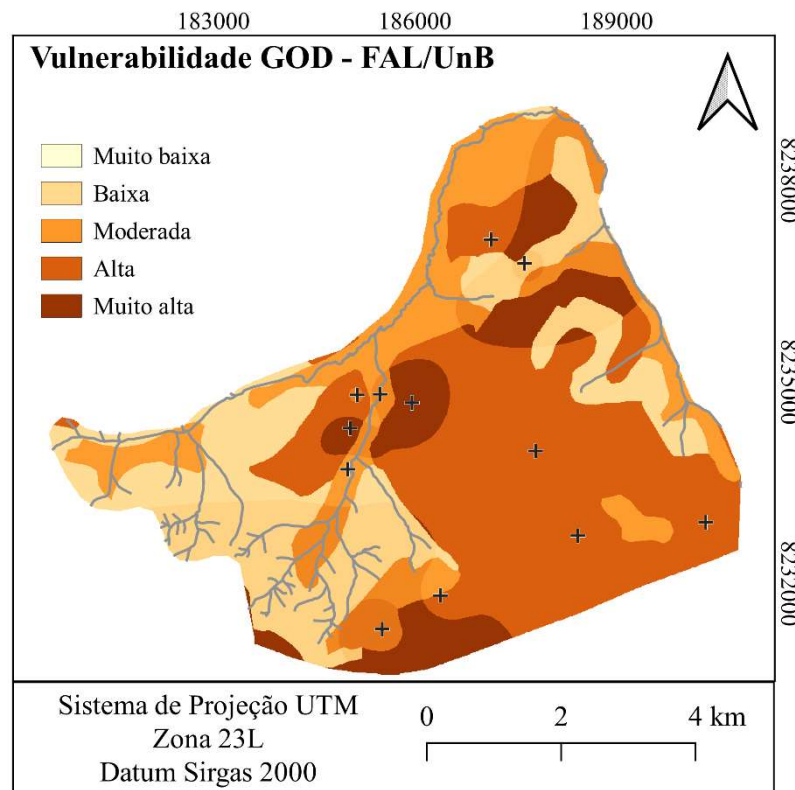
No mapa da condutância longitudinal (Figura 24) gerado a partir da interpolação dos dados de campo das SEVs, a FAL enquadra-se toda na classe de vulnerabilidade alta ( $S < 0.03$ ), conforme valores de S descritos por Braga (2016). Desse modo, a FAL apresenta vulnerabilidade alta quando se consideram os valores de S e os padrões definidos na literatura.

Assim, os valores extremamente reduzidos de S (entre 0.0002 e 0.007 Siemens) foram reclassificados para demonstrar variações de áreas que são ainda mais vulneráveis dentro de toda a área com vulnerabilidade alta na FAL. Silva (2019) em sua análise do grau de vulnerabilidade do aquífero Barreiras no Rio Grande do Norte, a partir da aplicação de dados hidrogeofísicos, encontrou valores bem reduzidos de S (0,0091 a 0,0140 Siemens), considerando como sendo áreas menos protegidas.



De acordo com a condutância, a área, indicou o grau de proteção baixo do aquífero. Isso pode ocorrer, devido aos maiores valores de condutividade hidráulica do aquífero que representa maior circulação de fluidos e por ser localizada nas partes em que a zona vadosa é composta por uma porcentagem maior de areia em que se torna mais vulnerável.

**Figura 24 - Mapa de vulnerabilidade do método GOD.**



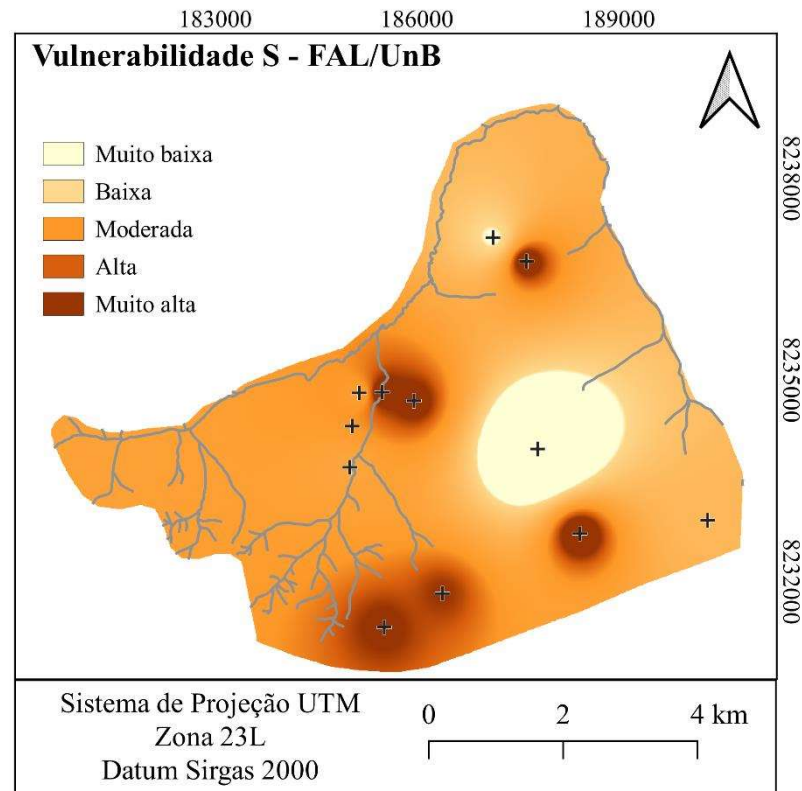
**Fonte: Autoria própria**

Os menores valores de condutância longitudinal (Tabela 8) estão estimados nos poços de monitoramento com menor espessura e maior resistividade elétricas das camadas do aquífero, como no PM4 que a espessura do aquífero é de 3.00 m. Assim, a FAL apresenta relativamente baixas espessuras do aquífero o que pode diminuir a capacidade de proteção.

No mapa do GLSI (Figura 26), estimado para cada poço de monitoramento e posteriormente interpolado para a FAL, a vulnerabilidade indicou uma área de 27,984% com vulnerabilidade alta, sendo a maioria da área, como no GOD. Sendo na mesma localização que nos demais métodos que não utilizaram de dados da geofísica (DRASTIC e GOD). George (2021) aponta em seu estudo na Nigéria, a eficácia do GLSI como sendo uma técnica

significativa para representação de áreas susceptíveis à contaminação, com o foco na espessura da camada subjacente ao aquífero.

**Figura 25 - Mapa de vulnerabilidade do método da condutância longitudinal.**

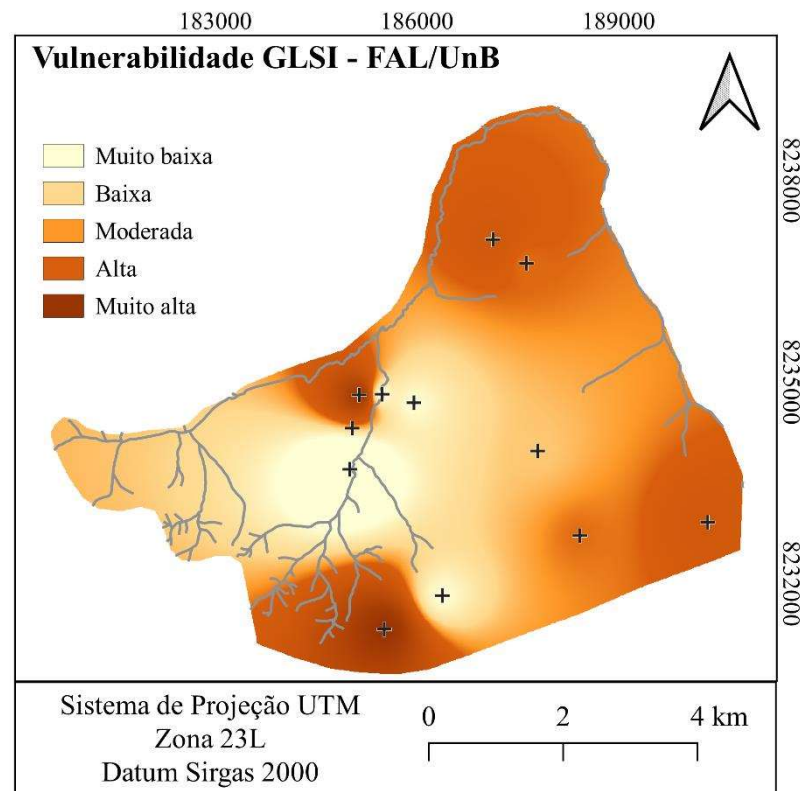


**Fonte: Autoria própria**

A FAL é composta predominantemente de latossolos que são mais susceptíveis a percolação de contaminantes e a alta vulnerabilidade deve ser atribuída também a características geológicas e à associação destas com aspectos geomorfológicos como os tipos de coberturas que não impermeabilizam o solo (áreas agrícolas e pastagens) (Francisco *et al.*, 2019).

Por meio dos mapas de vulnerabilidade resultantes dos métodos de condutância longitudinal, GOD, DRASTIC e GLSI, foi possível estabelecer a classificação da vulnerabilidade à contaminação das camadas acima do aquífero que de modo geral, o aquífero da FAL foi classificado com a vulnerabilidade alta. Este resultado pode ser devido, às características predominantes de pequenas profundidades do NA e materiais arenosos, muito permeáveis e que se correlacionam a altos valores de resistividade, resultando em baixos valores de condutância longitudinal unitária (Francisco *et al.*, 2019).

**Figura 26 - Mapa de vulnerabilidade do método GLSI.**



Fonte: Autoria própria

#### **7.4 Confiabilidade dos dados geofísicos e proposição de cenários de águas subterrâneas para a gestão ambiental**

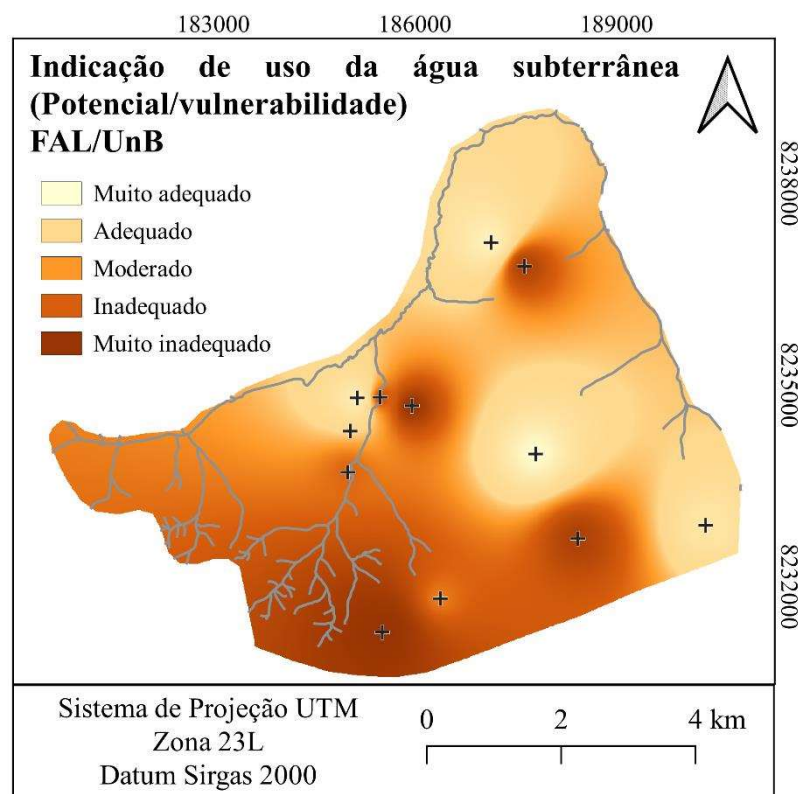
Os valores de resistividade representaram a identificação da litologia da zona saturada e não saturada. De acordo com Barros (2021) a caracterização da litologia e da permeabilidade da zona não saturada são parâmetros com menor facilidade de serem obtidos no quesito de vulnerabilidade. Nesse sentido, a aplicação da SEV favorece a maior precisão dos estudos de vulnerabilidade das águas subterrâneas.

As classes de potencial e vulnerabilidade aquífera geraram resultados coerentes em comparação com resultados obtidos a partir de métodos consolidados, possibilitando uma avaliação ambiental preliminar da área de estudo, sem a necessidade de perfuração e instalação de poços de monitoramento. A razão entre as camadas de potencial de exploração derivada do índice  $h_{\text{vadoso}} * h_{\text{aquifer}} * 1/\rho_{\text{aquifer}}$  e de vulnerabilidade natural GLSI, ambas consideradas visualmente mais adequadas em comparação com métodos padrão, resultou no mapa de indicação de uso da água subterrânea na FAL (Figura 27).

A partir do mapa de indicação foi possível identificar zonas da FAL propícias para o uso da água subterrânea, considerando o potencial de rendimento do aquífero e a vulnerabilidade a contaminação. Áreas classificadas como “muito adequadas” ao uso da água indicam a possibilidade de localização de um aquífero produtivo em uma área com reduzida vulnerabilidade à contaminação. Em contrapartida, a combinação de áreas com reduzido potencial de exploração e vulnerabilidade à contaminação elevada resultou em zonas “muito inadequadas” ao uso da água subterrânea.

O mapa de indicação de uso da água pode ser uma alternativa de caracterização do ordenamento do uso da água subterrânea, combinando informações indiretas de potencial e vulnerabilidade do aquífero a partir de SEV. Contudo, limitações na quantidade de PMs podem ter influenciado o resultado da interpolação e, conseqüentemente precisão das estimativas a respeito do aquífero.

**Figura 27 - indicação de uso da água subterrânea na FAL.**



**Fonte: Autoria própria**

Se aperfeiçoados, os resultados dessa avaliação podem ser usados no direcionamento dos recursos e das devidas atividades de uso da terra para as áreas mais propícias. Pois, com a criação de mapas de vulnerabilidade e modelos geolétricos de potencial de água, pode-se

estimar diferentes cenários de exploração para planejar as atividades humanas e incrementar os planos de recursos hídricos.

A partir da delimitação de áreas propícias ou não à exploração do aquífero, medidas de proteção e/ou remediação das águas subterrâneas podem ser direcionadas com maior assertividade e com mais viabilidade econômica nos planos de recursos hídricos. De modo que oriente a quantidade de exploração de recursos hídricos condizente com as estimativas de potencialidade de água subterrânea. Com a identificação dos pontos de maior sensibilidade hidrogeológica é possível a proposição de estratégias para a elaboração de um modelo de gestão das águas subterrâneas nesta área de estudo.

## **8. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Por meio da sondagem elétrica vertical (SEV) foi possível obter informações litológicas consideráveis de modo indireto e os modelos geoeletricos apresentaram correspondência com os modelos litológicos, tanto com relação ao número de camadas quanto às espessuras, demonstrando a possibilidade de utilização da SEV para representação das variações litológicas. Considerando os modelos obtidos com ajuste satisfatório aos dados de campo, foi possível diferenciar camadas do solo por meio das medidas de resistividade elétrica em subsuperfície. Assim, a descrição previamente realizada da litologia dos poços de monitoramento permitiu validar o modelo geofísico-litológico interpretado.

Além da litologia, conforme apresentado anteriormente, o nível da água subterrânea obtido em conjunto com a SEV foi utilizado para validação da informação geofísica. Nesse caso, vale ressaltar a tendência de redução nos valores de resistividade elétrica do solo em profundidades condizentes com a ocorrência dos aquíferos intergranulares. Para cinco dos onze PMs, a transição entre as camadas mais resistivas e menos resistivas foi aproximada à posição do lençol freático.

Os parâmetros selecionados sintetizaram a influência de um conjunto de fatores (topografia, litologia, solo, nível de água, recarga) que contribuem para a estimativa da vulnerabilidade das águas subterrâneas e potencialidade de geração de águas. Assim, como a comparação entre os métodos de análise que utilizam os parâmetros geoeletricos para avaliação indireta do aquífero.

Foi possível estabelecer comparação visual entre os mapas que utilizaram parâmetros geofísicos e os que não utilizaram os dados de SEV, indicando a correspondência com relação às áreas definidas como de potencial muito alto, alto, moderado, baixo e muito baixo entre eles.

Inferindo-se a partir da resistividade elétrica do aquífero as zonas com maior e menor potencialidade de água e as áreas mais propícias para o uso da água subterrânea, considerando o potencial de rendimento do aquífero e a vulnerabilidade a contaminação.

Foi possível avaliar a vulnerabilidade intrínseca de aquíferos livres granulares, a partir da ponderação e integração de parâmetros geofísicos, sendo um fator interessante considerando o possível cenário de escassez de dados. Mesmo sem perfuração de poços e levantamento de solos, foi possível estabelecer uma possível vulnerabilidade da FAL que se assemelha aos resultados descritos com os métodos que não utilizaram a geofísica (DRASTIC e GOD).

A estimativa da vulnerabilidade natural da área seguindo uma classificação é essencial para o gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos. Entretanto, os dados necessários para a realização dos métodos de análise da vulnerabilidade podem não estar disponíveis. Diante disso, a utilização do método elétrico de corrente contínua, resultou em uma alternativa aceitável para a obtenção destes dados.

Os resultados obtidos podem ser usados como uma possível alternativa para perfuração de novos poços de observação viabilizando o tempo e o custo, devido a possíveis limitações ambientais de perfuração, por exemplo. Características como a resistividade, espessura e litologia das camadas do aquífero, juntamente com a vulnerabilidade da água subterrânea foi determinada pelo método aplicado.

Para os métodos de vulnerabilidade que utilizaram os dados da SEV (Condutância longitudinal e GLSI) foi possível identificar, na área de ocorrência do aquífero livre, zonas com diferentes índices de vulnerabilidade, mas devido aos poços de monitoramento estarem mais concentrados, o nível de precisão dos dados possa ser menor. Para uma melhor precisão e maior detalhamento das áreas seria necessário maiores quantidades de SEVs e uma melhor distribuição dos pontos de monitoramento.

Os dados organizados no SIG e os modelos resultantes desse processo são capazes de gerar de forma contínua e aprimorada simulações de possíveis cenários e aperfeiçoamento das ações de gestão ambiental. Visto que a capacidade de proteção da FAL foi estabelecida como muito baixa e com classe alta de vulnerabilidade. Por isso, o exercício de atividades na FAL deve ser planejado e gerenciado com muita cautela pelo gestor dessa Unidade da UnB e demais gestores públicos, visto que a alta vulnerabilidade do aquífero impõe muitas restrições quanto ao uso e ocupação do solo. E com a avaliação ambiental preliminar da área é possível que este método possa auxiliar no planejamento e gerenciamento do uso e exploração das águas subterrâneas por meio da análise da vulnerabilidade relativa de áreas de contaminação e da potencialidade de geração de água.

## **9. RECOMENDAÇÃO PARA TRABALHOS FUTUROS**

Por se tratar de um tema para fins de pesquisa e monitoramento, trabalhos futuros podem ser continuados no que se refere os seguintes tópicos:

- Redistribuição das SEVs, com vista a obter informações geoeletricas de locais mais amplos a fim da melhor precisão dessas informações obtidas de modo indireto;
- Compilação do banco de dados dessa área para a avaliação dos possíveis cenários hidrogeológicos para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos; e
- Incorporação de métricas de avaliação da precisão e das incertezas dos dados geofísicos na avaliação dos aquíferos.

## REFERÊNCIAS

ABDULRAZZAQ, Z.T.; OKECHUKWU, E.A.; NADIA, A.A.; SUNDAY, E. E. Identification of potential groundwater locations using geophysical data and fuzzy gamma operator model in Imo, Southeastern Nigeria. **Applied Water Science**, 2020. 10:188 <https://doi.org/10.1007/s13201-020-01264-6>.

ADASA (Agência Reguladora de Águas e Saneamento do Distrito Federal). **Avaliação de aquíferos favoráveis para complementação do abastecimento de água no Distrito Federal e locação de regiões de poços tubulares profundos: regiões atendidas e não atendidas pelo sistema integrado Descoberto – Santa Maria/ Torto**. Consultoria Técnica. Relatório final integrado, 2018. Brasília: ADASA, 105 p.

ADASA (Agência Reguladora de Águas e Saneamento do Distrito Federal). **Diagnóstico e Proposta de Gestão das Reservas e Disponibilidades das Águas Subterrâneas no Distrito Federal, Considerando as Diferentes Regiões Administrativas e a Situação Atual de Uso e Ocupação do Solo**, 2016. Brasília: ADASA, 99 p.

ADASA (Agência Reguladora de Águas e Saneamento do Distrito Federal). **Plano Distrital de Saneamento Básico - relatório síntese**. 2017. Disponível em: [http://www.adasa.df.gov.br/images/Produtos-PDSB/Produto\\_7/1\\_PDSB\\_DF\\_subproduto\\_7.2\\_1017\\_VF\\_Sintese.pdf](http://www.adasa.df.gov.br/images/Produtos-PDSB/Produto_7/1_PDSB_DF_subproduto_7.2_1017_VF_Sintese.pdf). Acesso em: mar. 2020.

ADASA (Agência Reguladora de Águas e Saneamento do Distrito Federal). Relatório de Fiscalização - RVF/COFA/013/2021. **Relatório de Monitoramento Regular das Vazões Captadas de Água Para Abastecimento**. Brasília: ADASA, 2 -3 p. 2021.

ALLER, L.; BENNET, T.; LEHR, J. H.; PETTY, R. J.; HACKETT, G. DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeological settings. 1987. EPA/600/2-87/035. **US Environmental Protection Agency**, Ada, OK, USA.

AL-OTHMAN, ABDULAZIZ A. Enhancing groundwater recharge in arid region-a case study from Central Saudi Arabia. **Scientific Research and Essays** Vol. 6(13), pp. 2757-2762, 4 July, 2011.

ANA (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico). **Atlas águas: segurança hídrica do abastecimento urbano**, 2021 – Brasília: ANA, 332 p.: il. ISBN: 978-65-88101-19.

ASRY Z.; SAMSUDIN A. R.; YAACOB W. Z.; YAAKUN J. Groundwater Exploration Using 2-D Geoelectrical Resistivity Imaging Technique at Sungai. Udang, Melaka. **Journal of Earth Science and Engineering** 2 (2012) 624-630.

BARROS, M.F.S.; LOURO, V.H.A.; TERADA, R.K.; MARQUES, C.H.G.; SARAIVA, F.A.; HIRATA, R. Sondagens elétricas verticais na cartografia da vulnerabilidade à contaminação do Aquífero Adamantina, em Urânia, São Paulo. Revista do Instituto de Geociências - USP. **Geol.**



USP, *Sér. cient.*, São Paulo, v. 21, n. 1, p. 8-102, Março 2021. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v21-173647>.

BAZIN S., PFAFFHUBER A. A. Mapping of quick clay by electrical resistivity tomography under structural constraint. *Journal of Applied Geophysics* 98 (2013) 280–287.

BHATTACHARYA P.K, PATRA, H. P. **Direct current geoelectric sounding principals and interpretation.** *Methods Geochem Geophys* 9:1–135, 1968.

BIÈVRE, G.; JONGMANS, D.; WINIARSKI, T.; ZUMBO, V. Application of geophysical measurements for assessing the role of fissures in water infiltration within a clay landslide (Trieves area, French Alps). *Hydrol. Process.* 26, 21 –214 (2012).

BOBACHEV, A. A; MODIN, I. N; PERVAGO, E. V; SHEVIN, V.A. IPW2Win– Programs’ set for 1D SEV data interpretation. Moscow State University –Geological Faculty– Departament of Geophysics, 1999. Disponível: [www.geol.msu.ru/deps/geophys/rec\\_labe.htm.IPI\\_min.doc](http://www.geol.msu.ru/deps/geophys/rec_labe.htm.IPI_min.doc), acesso em 09 de fevereiro de 2022.

BRAGA, A.C.O. Estimativa da vulnerabilidade natural de aquíferos: uma contribuição a partir da resistividade e condutância longitudinal. *Rev. Bras. Geof.* 26 (1). Mar, 2008. DOI <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2008000100005>.

BRAGA, A.C.O. **Geofísica aplicada: Métodos geoeletricos em hidrogeologia.** São Paulo: Oficina de textos. 159 p, 2016.

BRAGA, A.C.O. **Módulo: Métodos Geoeletricos Aplicados nos Estudos de Captação e Contaminação das Águas Subterrâneas.** DGA – IGCE/Campus de Rio Claro - Unesp 2007.

BRASIL. **Resolução CNRH Nº 15 de 11 de janeiro de 2001.** Estabelece diretrizes gerais para a gestão de águas subterrâneas. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Disponível: [www.mma.gov.br](http://www.mma.gov.br), acesso em 25 de março de 2021.

BRASIL. **Resolução CNRH Nº 17, de 29 de maio de 2001.** Diretrizes complementares para a elaboração dos Planos de Recursos Hídricos de bacias hidrográficas. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Disponível: [www.mprs.mp.br](http://www.mprs.mp.br), acesso em 25 de março de 2021.

CAMPOS, J.E.G. Hidrogeologia do distrito Federal: subsídios para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos. *Rev. Bras. Geoc.* 1:41-48, 2004.

CAMPOS, J.E.G.; CUNHA, L.S. Caracterização Hidrogeológica da ocorrência de aquífero termal no Distrito Federal. São Paulo, UNESP, *Geociências*, 2015. v. 34, n. 2, p.210- 223.

CAMPOS, J.E.G.; FREITAS-SILVA, F.H. **Hidrogeologia do Distrito Federal. In: Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal.** Brasília: IEMA/SEMATEC/UnB, Parte IV. 1998. 86p.

CAMPOS, J.E.G.; GASPAR, M. T. P.; GONÇALVES, T. D. Relatório de Consultoria Técnica. **Gestão de recursos hídricos subterrâneos no Distrito Federal: diretrizes, legislação,**

**critérios técnicos, sistema de informação geográfica e operacionalização.** Brasília: BNWPP/ IBRD/ ADASA, 2007.

CANIANI, D.; LIOI, D.S.; IGNAZIO M.; MANCINI, I.M.; MAIS, S. Hierarchical classification of groundwater pollution risk of contaminated sites using Fuzzy Logic: A Case study in the Basilicata Region (Italy). **Water**, v. 7, p. 2013-2036, 2015.

CARLOS, I.M.; ELIS, V.R.; PRADO, R.L.; PORSANI, J.L. Métodos geofísicos integrados para a caracterização hidrogeológica dos aquíferos da microbacia Andes, Bebedouro, em São Paulo. **Revista Brasileira de Geociências**, volume 42(3), 2012.

CODEPLAN (COMPANHIA DE PLANEJAMENTO DO DISTRITO FEDERAL). **Atlas do Distrito Federal.** Brasília: Secretaria do Governo/Secretaria da Educação e Cultura/CODEPLAN, v. 1. 78 p, 1984.

CODEPLAN (COMPANHIA DE PLANEJAMENTO DO DISTRITO FEDERAL). **Pesquisa Distrital por Amostra de Domicílios - Distrito Federal - PDAD/DF 2013.** Brasília (DF) – dezembro de 2014.

CUSTÓDIO, E.; LLAMAS, M.R. Hidrogeologia subterrânea. 2a ed. Barcelona: **Ediciones Omega**, 1983. 2v.

CUTRIM, A.O.; CAMPOS, J.E.G. Avaliação da vulnerabilidade e perigo à contaminação do Aquífero Furnas na cidade de Rondonópolis (MT) com aplicação dos métodos GOD e POSH. **Revista Geociências**, v.29, n. 3. 2010.

CUTRIM, A.O.; SHIRAIWA, S. Prospecção de água subterrânea no sudoeste do município de Rondonópolis (MT) usando sondagem elétrica vertical. **Revista Brasileira de Geofísica, Brasil**, v. 29, n. 4, p. 745-752, 2011.

DE ALMEIDA, A. **Dinâmica espaço-temporal da umidade do solo e sua relação com a recarga de águas subterrâneas em diferentes condições de uso e cobertura do solo no domínio Cerrado.** Brasília: Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Tese de Doutorado em elaboração, 2020.

DE ALMEIDA, A. **Estudo da Variação do Nível Piezométrico na Região da Lagoa Bonita Distrito Federal.** Planaltina – DF, 2013. f. 87. Monografia - Faculdade UnB Planaltina, Universidade de Brasília.

DE ALMEIDA, A.; MACIEL, D.F; SOUSA, K.F.; NASCIMENTO, C.T.C.; KOIDE, S. Vertical Electrical Sounding (VES) for Estimation of Hydraulic Parameters in the Porous Aquifer. **Water** 2021, 13, 170. <https://doi.org/10.3390/w13020170>.

DE ALMEIDA, A.; NASCIMENTO, C.T.C.; FREIRE, E.R.; MACIEL, D.F; SOUSA, K.F.; TÁVORA, B.E.; MOTA, F.C.M.; SIQUEIRA, M.B.B.; MAGGIOTTO, S.R.; UAGODA, R.E.S.; KISAKA, T.B.; SALEMI, L.F. MENDONÇA-GALVÃO, L.; SILVA, C.L.; KOIDE,

S. Monitoramento hidrológico no Cerrado: Panorama da aquisição de dados em campo na Bacia do Ribeirão do Gama, Distrito Federal. **XXIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Associação Brasileira de Recursos Hídricos.

DISTRITO FEDERAL. **Resolução/ADASA N° 01, de 28 de fevereiro de 2011**. Define as disponibilidades hídricas dos aquíferos subterrâneos no território do Distrito Federal. Disponível: [www.adasa.df.gov.br](http://www.adasa.df.gov.br), acesso em 25 de março de 2021.

DISTRITO FEDERAL. **Resolução/ADASA N° 001, de 16 de março de 2022**. Institui o Cadastro de Agentes Perfuradores de Poços no Distrito Federal e dá outras providências. Disponível: [www.adasa.df.gov.br](http://www.adasa.df.gov.br), acesso em 21 de março de 2022.

DISTRITO FEDERAL. LEI N° 2.725, de 13 de junho de 2001. **Institui a Política de Recursos Hídricos e cria o Sistema de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Distrito Federal**. Disponível: <http://www.sinj.df.gov.br>, acesso em 25 de março de 2022.

DISTRITO FEDERAL. Tribunal de Contas do Distrito Federal (TCDF). Secretaria de auditoria. Terceira divisão de auditoria. 1 auditoria operacional. Relatório final. **Exame do controle de Outorgas de Uso de Recursos Hídricos na Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do DF – Adasa**. (Processo n° 2.350/2018) Brasília, 2018.

DUARTE, M.L.; ZANCHI, F.B.; NEVES, J.R.D.; COSTA, H.S.; JORDÃO, W.H.C. vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas no município de Humaitá, Amazonas, Brasil doi:10.4136/ambi-agua.1797. **Rev. Ambient. Água** vol. 11n. 2Taubaté –Apr. / jun. 2016.

EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) **Levantamento de reconhecimento dos solos do Distrito Federal**. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SNLCS, 1978. 455 p.

FATOBA, J.O.; OMOLAYO, S.D.; ADIGUN, E.O. Using geoelectric soundings for estimation of hydraulic characteristics of aquifers in the coastal area of Lagos, southwestern Nigeria. **International Letters of Natural Sciences**, v. 6, 2014.

FEITOSA, F.A.C.; FILHO, J.M.; FEITOSA, E.C.; DEMETRIO, J.G.A. Hidrogeologia: conceitos e aplicações. **3. Ed. Ver. E ampl.** – Rio de Janeiro: CPRM: LABHID, 2008. 812 p.

FELFILI, J.M. **Structure and dynamics of a gallery forest in central Brazil**. Ph.D. Thesis, University of Oxford, Oxford. 360p, 1993.

FOSTER, S.; HIRATA, R. **Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data**. Lima: WHO/PAHO/HPECEPIS, 1988. p. 81.

FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D'ELIA, M.; PARIS, M. Proteção da qualidade da água subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais. São Paulo: **Servemar**, 2006. p.15-81.

FOSTER, S.S.D.; HIRATA, R., ANDREO, B. The aquifer pollution vulnerability concept: aid or impediment in promoting groundwater protection? **Hydrogeology**, 2013, 21, 1389-1392. <https://doi.org/10.1007/s10040-013-1019-7>.

FOSTER, S.S.D.; HIRATA, R.C.A.; GOMES, D.; DYELIA, M.; PARIS, M. Groundwater quality protection: a guide for water utilities, municipal authorities and environment agencies. Washington, D.C.: **The World Bank**, 2002.

FRANCISCO, R.F; BRAGA, A.C.O.; ALBUQUERQUE FILHO L.J. SDR: Um novo método para avaliar a vulnerabilidade à contaminação de aquíferos livres granulares. São Paulo, UNESP, **Geociências**, v. 38, n. 1, p. 207 - 219, 2019.

FREEZE, R.A.; CHERRY, J.A. **Groundwater**. USA: Prentice-Hall, 1979. 604 p.

FREITAS-SILVA F.H.; CAMPOS J.E.G. Geologia do Distrito Federal. In: IEMA/SEMATEC/UnB. **Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal**. Brasília. IEMA/ SEMATEC/UnB, v. 1, Parte I. 1998. 86p.

GEORGE, N.J. Integrating hydrogeological and second-order geo-electric índices in groundwater vulnerability mapping: A case study of alluvial environments. **Applied Water Science** (2021) 11:123. <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01437-x>.

GIACOMAZZO, A.P.; ALMEIDA, W.S. Estudo do potencial de contaminação do Aterro Controlado do Jôquei Clube, Distrito Federal. Artigo Técnico. **Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES**. Dezembro, 2020. <https://doi.org/10.1590/S1413-4152202020180223>.

GONÇALVES, T.D.; ROIG, H.L.; CAMPOS, J.E.G. Sistema de informação geográfica como ferramenta de apoio à outorga dos recursos hídricos subterrâneos no Distrito Federal. **Revista Brasileira de Geociências**. 39(1): 169-180, março de 2009.

HASAN, M.; SHANG, Y., AKHTER, G.; JIN, W. Geophysical Assessment of Groundwater Potential: A Case Study from Mian Channu Area, Pakistan. (2017). **Groundwater**. doi:10.1111/gwat.12617.

HEIGOLD, P.C.; GILKESON, R.H.; CARTWRIGHT, K.; REED, P.C. Aquifer transmissivity from surficial electrical methods. **Groundwater**. 1979, 338–345.

HIRATA, R.; SUHOGUSOFF, A., MARCELLINI, S.S.; VILLAR, P. C.; MARCELLINI, L. **As águas subterrâneas e sua importância ambiental e socioeconômica para o Brasil**. São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, Instituto Trata Brasil, CEPAS|USP., 2019. 64 p.

IBGE (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA). Manual técnico de pedologia. Rio de Janeiro: **IBGE**, 2007. 316 p. Disponível em: <<http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv37318.pdf>>. Acesso em: 20 de março de 2022.

IKPE, E. O.; EKANEM, A. M.; GEORGE, N. J. Modelling and assessing the protectivity of hydrogeological units using primary and secondary geoelectric indices: a case study of Ikot Ekpene Urban and its environs, southern Nigeria. **Modeling Earth Systems and Environment**, 2022. DOI <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01366-x>.

KARMANN, I. Ciclo da água, água subterrânea e sua ação geológica. In: TEIXEIRA, W.; FAIRCHILD, T. R.; TOLEDO, M.C.; TAIOLI, F. (Org.) Decifrando a terra. São Paulo: **Companhia Editora Nacional**, 2008, 623 p.

KHALILIDERMANI, M.; KNEZ, D.; ZAMANI, M.A.M. Empirical Correlations between the Hydraulic Properties Obtained from the Geoelectrical Methods and Water Well Data of Arak Aquifer. **Energies** 2021, 14, 5415. <https://doi.org/10.3390/en14175415>.

KOTB, A.D.M; KHALED, M.A.; BARSEEM, M.S. Groundwater condition based on geoelectrical technique and Dar Zarrouk parameters between El Alamein and El Dabaa—Egypt. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 11, n. 19, p. 596, 2018.

LAMARI, C.R. (Coor.). **Os recursos hídricos da Terra**. Campinas: Editora Unicamp, 2000, bloco 4, parte 1, 146 p.

LIU, W.; WU, J.; FAN, H.; DUAN, H.; LI, Q.; YUAN, Y. Estimations of evapotranspiration in an age sequence of Eucalyptus plantations in subtropical China. **PLoS ONE** 12(4): e0174208. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0174208>.

LOKE M. H. **Topographic modelling in electrical imaging inversion**. Exhibition-Glasgow, Scotland, 29 May - 2 June 2000.

LOUSADA, E.O.; CAMPOS, J.E.G. Proposta de modelos hidrogeológicos conceituais aplicados aos aquíferos da região do Distrito Federal. **Revista Brasileira de Geociências**, Volume 35, 2005.

MACIEL, D.F.; SOUSA, K.F.; DE ALMEIDA, A.; NASCIMENTO, C.T.C. 2020. Modelo geoeletrico aplicado à caracterização de aquíferos intergranulares no Distrito Federal. Universidade de Brasília – UnB, Brasília, Brasil. **50° CBG**. Anais Volume 1 p. 105, 2020.

MAIA, J.M.F.; BAPTISTA, G.M.M. Clima. In: Fonseca, F. O. (Org.). **Águas Emendadas**. Brasília: Secretaria de Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente, 2008. p. 101-110.

MAILLET. R. The fundamental equations of electrical prospecting, **Geophysics** I2, 529-556, 1947.

MARTINS, E.D.C.J.; MELLO, O.A.D.; REATTO, G.D.A.; MORAES, A.; PIRES, R.A.V.D.; GUIMARÃES, A.C.B.; FONTES, R. **Mapeamento da superfície basal do manto de intemperismo pelo comportamento da resistividade elétrica do Distrito Federal**. 2008.

MARTINS, E.S; REATTO, A.; FARIAS, M.F.R; SILVA, A.V; BLOISE, G.L.F.; CARDOSO, E.A. Geologia da margem direita do Córrego Divisa, Bacia do São Bartolomeu – DF, escala 1:10.000. Planaltina: **Embrapa Cerrados**, 2002. 21 p.

MELLO, R.M.; CASTRO, C.M.S.N. Exploração de água subterrânea no Distrito Federal. Gestão por Sistema hidrogeológico. **XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2011.

MELLO, R.M.; NASCIMENTO, C.T.C.; KOIDE, S. Levantamento geofísico, monitoramento e modelagem matemática da contaminação do lençol freático por efluente de charqueadora. **XII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**, 2014.

MGBOLU, C.C.; OBIADI, I.I.; OBIADI, C.M.; OKOLO, C.M.; IRUMHE, P.E. Integrated groundwater potentials studies, aquifer hydraulic characterisation and vulnerability investigations of parts of Ndokwa, Niger Delta Basin, Nigeria. Department of Geological Sciences, Nnamdi Azikiwe University, Awka, Nigeria. **Solid Earth Sciences**, 2019. DOI <https://doi.org/10.1016/j.sesci.2019.06.002>.

MIERZWA, J.C.; HESPANHOL, I. **Água na indústria: uso racional e reuso**. São Paulo: Oficina de textos, 2005. 143p.

MORAES, L.L.; CAMPOS, J.E.G. Hidrogeologia. In: Fonseca, F. O. (Org.). **Águas Emendadas**. Brasília: Secretaria de Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente. 2008. p. 122-131.

MOREIRA, C. A.; CAVALHEIRO, M. L. D.; PEREIRA, A.M.; SARDINHA, D.S. Análise das relações entre parâmetros geoeletricos e vazões para o aquífero livre de Caçapava do Sul (RS). **Águas Subterrâneas** (2013) 27(3): 45-59.

MOURA, P.; SABADIA, J.A.B.; CAVALCANTE, I.N. Mapeamento de vulnerabilidade dos aquíferos dunas, barreiras e fissural na porção norte do complexo industrial e portuário do Pecém, estado do Ceará. São Paulo, UNESP, **Geociências**, v. 35, n. 1, p.77-89, 2016.

NESHAT, A.; PRADHAN, B.; SHAFRI, H.Z.M. An Integrated GIS Based Statistical Model to Compute Groundwater Vulnerability Index for Decision Maker in Agricultural Area. **Indian Society of Remote Sensing**, 2014.

NIWAS, S.; SINGHAL, D.C. Estimation of aquifer transmissivity from Dar-Zarrouk parameters in Porous Media. **J. Hydrol.** 1981, 50, 393–399.

NIWAS, Sri; CELIK, Muhammed. Equation estimation of porosity and hydraulic conductivity of Ruhrtal aquifer in Germany using near surface geophysics. **Journal of Applied Geophysics**, v. 84, p. 77-85, 2012.

NYQUIST, J.E.; FREYER, P.A.; TORAN, L. Stream bottom resistivity tomography to map ground-water discharge. **Ground Water**, v. 46, n 4, p 561-569, 2008.

OGUAMA, B.E.; IBUOT, C.; AKA, M.U. Geophysical investigation of groundwater potential, aquifer parameters, and vulnerability: a case study of Enugu State College of Education (Technical). **Modeling Earth Systems and Environment**, v. 5, n. 3, p. 1123-1133, 2019.

OKIONGBO, K.S.; MEBINE, P. Estimation of aquifer hydraulic parameters from geoelectrical method—a case study of Yenagoa and environs, Southern Nigeria. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 8, n. 8, p. 6085-6093, 2015.

OLIVEIRA, H.M. **Análise de vulnerabilidade espacial do aquífero poroso do Conjunto Urbanístico de Brasília (CUB) a partir de métodos de indexação**. Dissertação de Mestrado. Brasília – Distrito Federal. Agosto – 2019.

ONI T.E; OMOSUYI G.O; AKINLALU A.A. Groundwater vulnerability assessment using hydrogeologic and geoelectric layer susceptibility indexing at Igbara Oke, Southwestern Nigeria, 2017. **NRIAG J Astron Geophys** 6(2):452–458. DOI <https://doi.org/10.1016/j.nrjag.2017.04.009>.

ORELLANA, E. **Prospeccion geoeletrica en corriente contínua**. Paraninfo. Madrid. 523 p. 1972.

REATTO, A.; MARTINS, E.S.; FARIAS, M.F.R.; SILVA, A.V.; CARVALHO, O.A.J. Mapa pedológico digital - SIG atualizado do DF escala 1:100.000 e uma síntese do texto explicativo: Planaltina: **Embrapa Cerrados**, 2004. 31 p.

RIEGER, F.A.; ZOLIN, C.A.; PAULINO, J.; SOUZA A.P.; MATOS, E.S.; MAGALHÃES, C.A.S.; FARIAS, A.F. Water Erosion on an Oxisol under Integrated Crop-Forest Systems in a Transitional Area between the Amazon and Cerrado Biomes. **Rev Bras Cienc Solo**. 2016; v40:e0150111

ROSA F. T., MOREIRA C. S., CARRARA A., SANTOS S. F. Análise das relações entre resistividade elétrica, condutividade hidráulica e parâmetros físico-químicos para o Aquífero Livre da Região de Corumbataí (SP). **Águas Subterrâneas**, v. 31, n. 4, p. 384-392, 2017.

SANTOS, H.G.; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C.; OLIVEIRA, V.A.; LUMBRERAS, J.F.; RIZZATO, M.C.; ALMEIDA, J.A.; CUNHA, T.J.F.; OLIVEIRA, J.B. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Embrapa, 2013. 353 p.

SEDHAB (**Sicad–Sistema Cartográfico Do Distrito Federal**) Escala 1:10.000. (R. e D. U. Secretaria de Habitação, ed.), Brasília, 2013. Brazil.

SERAPHIM, A.P.A.C.C. **Relações entre as áreas de recarga dos aquíferos e áreas destinadas à urbanização: estudo dos padrões de ocupação do solo da unidade hidrográfica do Lago Paranoá-DF**. TD - n. 55 (2018). Brasília: Companhia de Planejamento do Distrito Federal, 2018.

SHIRAIWA, S.; MACHADO, C.A.M.; CUTRIM, A.O.; SALOMÃO. F.X.T. Geofísica aplicada no mapeamento do topo do aquífero freático de uma vertente em Campo Verde, MT.

**XVI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas e XVII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços**, 2010.

SIKANDAR, P.; CHRISTEN, E. W. Geoelectrical sounding for the estimation of hydraulic conductivity of alluvial aquifers. **Water resources management**, v. 26, n. 5, p. 1201-1215, 2012.

SILVA, D.; MONTEIRO, D. P.; AGUIRRE, H. R. B.; SOARES, J. L. Análise da subsuperfície com sondagem elétrica vertical (SEV) nos municípios de Capanema e Primavera, nordeste do estado do Pará. 2018. São Paulo, UNESP, **Geociências**, v. 37, n. 2, p. 393 - 396, 408.

SILVA, J.J.A. **Análise do grau de vulnerabilidade do aquífero Barreiras a partir de dados hidrogeofísicos- área adjacente ao bairro de Emaús, Parnamirim - RN**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geofísica) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2019.

SILVA, L.A.P.; SOUZA, C.M.P.; LEITE, M.E.; FILQUEIRAS, R. Estimating Water Loss in an Environmental Protection Area - Minas Gerais, Southeast Brazil. **Caderno de Geografia**, v.30, n.62, 2020.

SOUSA, K.F.; MACIEL, D.F.; ALMEIDA, A.; NASCIMENTO, C.T.C. Identificação do nível da água subterrânea por meio de Sondagem Elétrica Vertical (SEV): um estudo de caso em aquíferos intergranulares no Distrito Federal. Universidade de Brasília – UnB, Brasília, Brasil. 2020. **50º CBG**. Anais Volume 1 p. 103.

TÁVORA, B.E. **Estudo da contaminação do lençol freático por hidrocarbonetos utilizando modelagem computacional. Dissertação de mestrado em tecnologia ambiental e recursos hídricos**. Universidade de Brasília. Faculdade de tecnologia. Departamento de engenharia civil e ambiental. Brasília/ DF: Março – 2010.

TELFORD, W., GELDART, L. P., e SHERIFF, R. E. **Applied Geophysics**. 2.ed.1990, Cambridge: Cambridge University Press.

UNB (UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA). **Histórico da Fazenda Água Limpa**, 2009. Disponível em: <[http://www.fal.unb.br/index.php?option=com\\_content&view=article&id=51:historico&ca=35:fazenda-agua-limpa&Itemid=61](http://www.fal.unb.br/index.php?option=com_content&view=article&id=51:historico&ca=35:fazenda-agua-limpa&Itemid=61)>. Acesso em: 10 jan. 2022.

VIRUPAKSHA, H.S.; LOKESH, K.N. Electrical resistivity, remote sensing and geographic information system approach for mapping groundwater potential zones in coastal aquifers of Gurpur watershed, **Geocarto International**, 2019. DOI: 10.1080/10106049.2019.1624986.

YAKOUB, K.H.; AZZEDINE, H. Standardized system for evaluating groundwater pollution. **MATEC Web of Conferences** 295, 2019. <https://doi.org/10.1051/mateconf/2019292004502004>.

ZANETTI, N. Estimativa da vulnerabilidade natural do aquífero livre no município de Rio Claro/SP. **Águas Subterrâneas**, 26, 2015.



ZARROCA, M; LINARES, R.; RODELLAS, V.; GARCIA-ORELLANA, J.; ROQUÉ, C.; BACH, J.; MASQUÉ, P. Delineating coastal groundwater discharge processes in a wetland area by means of electrical resistivity imaging, 224Ra and 222Rn. **Hydrological Processes**, v. 28, p. 2382 – 2395, 2014.

ZAVALA, L.M.; GARCÍA-MORENO, J.; GORDILLO-RIVERO, A.J.; JORDAN. A.; MATAIX-SOLERA, J. Natural soil water repellency in different types of Mediterranean woodlands. **Geoderma** 226–227 (2014) 170–178.

ZEE-DF (Zoneamento Ecológico-Econômico do Distrito Federal). Caderno Técnico. **Matriz Ecológica**. Brasília, 2017. Disponível: <https://www.zee.df.gov.br/>, acesso em 09 de março de 2022.

ZHOU, Q.Y.J.; SATO, A. Three-dimensional spatial and temporal monitoring of soil water content using electrical resistivity tomography. **Water Resources Research**, v. 37, n. 2, p. 273–285, 2001.

ZOBY, J.L.G.; DUARTE, U. Caracterização hidrogeológica da bacia do Ribeirão Sobradinho – Brasília (DF). **Revista do Instituto de Geociências, USP**, v. 1, p. 79-99, 2001.