



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Andréa Alves Ferreira Silva

**Avaliação do potencial de captação de água subterrânea em áreas rurais  
de municípios do Noroeste Fluminense**

Rio de Janeiro

2021

Andréa Alves Ferreira Silva

**Avaliação do potencial de captação de água subterrânea em áreas rurais  
de municípios do Noroeste Fluminense**



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Saneamento Ambiental - Controle da Poluição Urbana e Industrial.

Orientador: Prof. Dr. Alfredo Akira Ohnuma Júnior

Coorientador: Prof. Dr. Marcelo dos Santos Salomão

Rio de Janeiro

2021

CATALOGAÇÃO NA FONTE  
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

S586 Silva, Andréa Alves Ferreira.  
Avaliação do potencial de captação de água subterrânea em áreas rurais de municípios do noroeste fluminense / Andréa Alves Ferreira Silva. – 2021.  
163f.

Orientador: Alfredo Akira Ohnuma Júnior.  
Coorientador: Marcelo dos Santos Salomão.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia ambiental - Teses. 2. Recursos hídricos - Administração - Teses. 3. Águas subterrâneas - Teses. 4. Geofísica - Teses. 5. Água - Captação - Teses. I. Ohnuma Júnior, Alfredo Akira. II. Salomão, Marcelo dos Santos. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. IV. Título.

CDU 556.3

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese, desde que citada a fonte.



Assinatura

07 / 04 / 2021

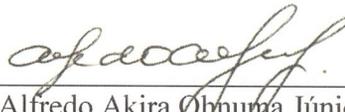
Data

## Avaliação do potencial de captação de água subterrânea em áreas rurais de municípios do Noroeste Fluminense

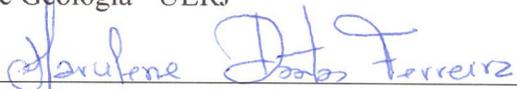
Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Saneamento Ambiental - Controle da Poluição Urbana e Industrial.

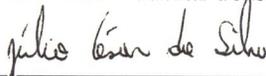
Aprovada em 09/03/2021

Banca Examinadora:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Alfredo Akira Ohnuma Júnior (Orientador)  
Faculdade de Engenharia - UERJ

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Marcelo dos Santos Salomão (Coorientador)  
Faculdade de Geologia - UERJ

  
\_\_\_\_\_  
Prof.ª Dr.ª Marcilene Dantas Ferreira  
Universidade Federal de São Carlos – UFSCAR

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Júlio César da Silva  
Faculdade de Engenharia - UERJ

Rio de Janeiro

2021

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador Alfredo Akira, por ter aceitado me conduzir neste trabalho e pelos ensinamentos inestimáveis oferecidos ao longo do percurso.

Ao meu coorientador Marcelo Salomão, pelo apoio irrestrito e colaboração em todas as etapas.

A todos os professores do PEAMB, pela envergadura em transmitir o conhecimento e cordialidade.

À Faculdade de Engenharia, pelo amparo acadêmico recebido em suas dependências.

À Faculdade de Geologia e Laboratório de Exploração Mineral (LEXMIN), pelo uso dos equipamentos e logística.

À Elaine Pinto, por sua colaboração e presteza nas requisições efetuadas.

Aos colegas do PEAMB, pela troca de experiências e aprendizado.

Ao Alexander Ferreira, por solucionar todos os entraves no âmbito da informática.

O Homem científico não pretende alcançar um resultado imediato. Ele não espera que suas ideias avançadas sejam imediatamente aceitas. Seus trabalhos são como sementes para o futuro. Seu dever é lançar as bases para aqueles que estão por vir e apontar o caminho.

*Nikola Tesla*

## RESUMO

FERREIRA, Andréa. *Avaliação do potencial de captação de água subterrânea em áreas rurais de municípios do Noroeste Fluminense*. 2021. 163f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro, 2021.

A região noroeste do estado do Rio de Janeiro, devido às características naturais da região, apresenta um clima com período seco de 4 a 6 meses. A deficiência hídrica dos municípios é aumentada substancialmente em razão do acentuado índice de desmatamento, uso e ocupação do solo com atividades agropecuárias sem manejo sustentável e elevado escoamento superficial. Estes aspectos acarretam a existência mais expressiva de córregos e riachos temporários, repercutindo na diminuição expressiva da vazão dos rios principais. Isto posto, a presente dissertação visou a avaliar o potencial de captação de água subterrânea em áreas rurais de municípios do Noroeste Fluminense, onde a demanda é maior em função das atividades desenvolvidas, e a indicar áreas potenciais para a perfuração de poços como alternativa aos sistemas convencionais de abastecimento. A pesquisa da água teve como alicerce da integração de dados: a caracterização ambiental da área de estudo a partir de informações associadas ao clima, morfologia, vegetação, solos, hidrografia, hidrogeologia, uso e ocupação do solo. Todos esses dados obtidos foram conjugados, de forma generalizada e não específica aos mapas geológicos (tipos de rochas e estruturas) dos municípios investigados. Os métodos geofísicos Elétrico, Eletromagnético e Magnetométrico foram aplicados para a obtenção de dados de subsuperfície nos locais indicados pela pesquisa como prováveis fontes para a captação de água. Os resultados da integração do conjunto de elementos comprovaram o potencial dessas áreas para a perfuração de poços. Um mapa foi elaborado para os três municípios, com a indicação georreferenciada de localizações propícias à captação do recurso hídrico subterrâneo para fins de exploração. As atividades de campo também permitiram identificar visualmente e georreferenciar os poços artesianos presentes nas áreas de estudo e não cadastrados no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS/CPRM), o que poderá contribuir na gestão dos recursos hídricos dos municípios investigados e para futuros estudos sobre a disponibilidade hídrica subterrânea na região.

Palavras-chave: Eletroresistividade; Magnetometria; GPR; Geofísica.

## ABSTRACT

FERREIRA, Andréa. *Potential evaluation of the groundwater abstraction in rural areas of municipalities in the Northwest of Rio de Janeiro State*. 2021. 163f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro, 2021.

The northwest region of the state of Rio de Janeiro, due to the natural characteristics of the region, presents a climate with a dry period of 4 to 6 months. The water deficiency of the municipalities is substantially increased due to the sharp rate of deforestation, land use and occupation with agricultural activities without sustainable management and high runoff. These aspects lead to a more expressive existence of temporary creeks and streams, with repercussions on the expressive decrease in the flow of the main rivers. That said, the present dissertation aimed to evaluate the potential for groundwater abstraction in rural areas of municipalities in the Northwest of Rio de Janeiro, where the demand is greater due to the activities developed and to indicate potential areas for drilling wells as an alternative to conventional supply systems. Water research was based on data integration: the environmental characterization of the study area, based on information associated with climate, morphology, vegetation, soils, hydrography, hydrogeology, land use and occupation. All these data obtained were combined, in a generalized way and not specific to the geological maps (types of rocks and structures) of the investigated municipalities. The geophysical methods Electric, Electromagnetic and Magnetometric were applied to obtain subsurface data in the locations indicated by the research as probable sources for water abstraction. The results of the integration of the set of elements confirmed the potential of these areas for drilling wells. A map was produced for the three municipalities, with georeferenced indication of locations conducive to capturing underground water resource for exploration purposes. The field activities also made it possible to visually identify and georeferenced the artesian wells present in the study areas and not registered in the Groundwater Information System (SIAGAS/CPRM), which may contribute to the management of water resources in the investigated municipalities and for future studies on underground water availability in the region.

Keywords: Electrical resistivity; Magnetometry; GPR; Geophysics.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Ciclo hidrológico.....	17
Figura 2.2 – Estruturas de edificação comprometida pelo rebaixamento do solo.....	20
Figura 2.3 – Unidades Prioritárias de Gerenciamento dos Recursos Hídricos do Brasil.....	21
Figura 2.4 – Grupo prioritário para a gestão dos recursos hídricos.....	22
Figura 2.5 – Panorama do potencial explotável de água subterrânea.....	23
Figura 2.6 – Percentagem de poços cadastrados no Brasil, por região.....	24
Figura 2.7 – Distribuição de poços de água cadastrados no país, por estado e no Distrito Federal.....	25
Figura 2.8 – Esquema do experimento de Henry Darcy (1956) sobre o fluxo de água em meio poroso.....	30
Figura 2.9 – Diagrama dos tipos de porosidade e estruturas dos poros.....	35
Figura 2.10 – Perfil de horizontes de solo e características de camadas subsuperficiais.....	36
Figura 2.11 – Diagrama esquemático dos componentes de aquíferos livres e confinados.....	42
Figura 2.12 – Arranjo Wenner.....	46
Figura 2.13 – Arranjo Schlumberger.....	47
Figura 2.14 – Arranjo Dipolo-dipolo.....	48
Figura 2.15 – Exemplo de diagrama de Sondagem Elétrica Vertical - SEV.....	49
Figura 2.16 – Arranjos de eletrodos.....	50
Figura 2.17 – Distribuição espacial da rede mundial de transmissores VLF.....	60
Figura 2.18 – Diagrama esquemático de um levantamento Magnetotelúrico.....	62
Figura 2.19 – Propagação do sinal eletromagnético pelo uso da técnica Slingram (ou HLEM). .....	64
Figura 3.1 – Fluxograma metodológico realizado durante a pesquisa desta dissertação.....	70
Figura 3.2 – Municípios da região noroeste do estado do Rio de Janeiro, com destaque para os da área de estudo.....	71
Figura 3.3 – Limites municipais de Miracema, São José de Ubá e sudoeste de Itaperuna e principais rodovias de acesso.....	72
Figura 3.4 – Evolução da lavoura e do faturamento atinentes às culturas de tomate, arroz e pepino no município de São José de Ubá-RJ.....	75
Figura 3.5 – Evolução da lavoura e do faturamento da produção agrícola no município de Miracema-RJ, considerando as culturas de tomate, arroz e banana.....	77

Figura 3.6 – Evolução da lavoura e do faturamento da produção agrícola no município de Itaperuna-RJ, considerando as culturas de arroz, pimentão e tomate.....	79
Figura 3.7 – Demanda hídrica por tipo de cultivo. ....	80
Figura 3.8 – Classificação Koppen-Geiger para o período entre 2026-2050.....	81
Figura 3.9 – Escala térmica do clima no Estado do Rio de Janeiro.....	83
Figura 3.10 – Precipitação total anual (2010 a 2019) da região noroeste do ERJ.....	84
Figura 3.11 – Precipitação média mensal da região noroeste do ERJ (2010 a 2019).....	84
Figura 3.12 – Mapa de uso e cobertura do solo dos municípios de Miracema, São José de Ubá e sudoeste de Itaperuna. ....	86
Figura 3.13 – Feição de colinas com elevação de 290 m, nos arredores da Fazenda Montinéia (Miracema). ....	87
Figura 3.14 – Mapa de elevação dos municípios de Miracema, São José de Ubá e sudoeste de Itaperuna.....	88
Figura 3.15 – Mapa de declividade dos municípios de Miracema, São José de Ubá e sudoeste de Itaperuna.....	89
Figura 3.16 – Remanescentes de vegetação dos municípios de Miracema, São José de Ubá e sudoeste de Itaperuna. ....	91
Figura 3.17 – Mapa das regiões hidrográficas do ERJ, com a localização da área de estudo. ....	93
Figura 3.18 – Hidrografia da área dos municípios de Miracema, São José de Ubá e sudoeste de Itaperuna. ....	94
Figura 3.19 – Mapa tectônico da porção central da Faixa Ribeira, com a localização da área de estudo. ....	97
Figura 3.20 – Exemplos de rochas da área de trabalho.....	98
Figura 3.21 – Mapa geológico da área de estudo.....	98
Figura 3.22 – Distribuição espacial das classes de solos dos municípios de Miracema, São José de Ubá e sudoeste de Itaperuna.....	100
Figura 3.23 – Domínios hidrogeológicos do ERJ com destaque à área de estudo no noroeste fluminense. ....	102
Figura 3.24 – Potencial de produtividade dos aquíferos no Estado do Rio de Janeiro e área de estudo indicada. ....	104
Figura 3.25 – Levantamento de dados na fazenda Montinéia, município de Miracema, pelo método elétrico com o equipamento Syscal Kid Switch.....	106
Figura 3.26 – Aquisição geofísica pelo método magnético no Campo do Grêmio, município de São José de Ubá - RJ. ....	108

Figura 3.27 – Utilização do método eletromagnético no Campo do Grêmio, São José de Ubá - RJ. ....	109
Figura 4.1 – Campo do Grêmio em São José de Ubá-RJ, local de aquisição geofísica. ....	112
Figura 4.2 – Integração de métodos geofísicos: Campo do Grêmio em São José de Ubá-RJ. ....	114
Figura 4.3 – Topografia do embasamento: Campo do Grêmio, em São José de Ubá RJ. ....	115
Figura 4.4 – Localização do Córrego Inveja, próximo à aquisição geofísica no campo do Grêmio.....	116
Figura 4.5 – Vila de Santa Maria, São José de Ubá-RJ, com aquisição geofísica. ....	117
Figura 4.6 – Integração de métodos geofísicos realizado na Vila de Santa Maria, em São José de Ubá-RJ. ....	118
Figura 4.7 – Topografia do embasamento na Vila de Santa Maria, em São José de Ubá-RJ. ....	119
Figura 4.8 – Localização da seção geofísica e do córrego sem nome na Vila de Santa Maria, em São José de Ubá-RJ. ....	120
Figura 4.9 – Sítio São Domingos, em São José de Ubá-RJ com aquisição geofísica.....	121
Figura 4.10 – Integração de métodos geofísicos no Sítio São Domingos, em São José de Ubá-RJ. ....	122
Figura 4.11 – Areias, no distrito de Miracema-RJ, com aquisição geofísica.....	124
Figura 4.12 – Integração de métodos Geofísicos no distrito de Areias, em Miracema-RJ. ....	125
Figura 4.13 – Topografia do embasamento em Areias, distrito de Miracema-RJ.....	126
Figura 4.14 – Montinéia, na cidade de Miracema-RJ, com aquisição geofísica. ....	127
Figura 4.15 – Integração de métodos geofísicos, em Montinéia, no município de Miracema-RJ. ....	128
Figura 4.16 – Localização da seção geofísica e do córrego sem nome em Montinéia, em Miracema-RJ. ....	129
Figura 4.17 – Área rural em Itajara, Itaperuna-RJ, local de aquisição geofísica.....	130
Figura 4.18 – Integração de métodos geofísicos, em Itajara, município de Itaperuna-RJ. ....	131
Figura 4.19 – Mapa de áreas potenciais para a captação de água subterrânea na região noroeste fluminense. ....	134

## LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Elementos predominantes para os mecanismos de vazão e classificação dos índices de permeabilidade. ....	33
Quadro 2.2 – Atenuação do sinal eletromagnético / permeabilidade relativa. ....	59
Quadro 2.3 – Equipamentos geofísicos utilizados e respectivas funções .....	68
Quadro 3.1 – Principais microbacias dos municípios estudados. ....	95

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Volume de água subterrânea retirado pelos países que mais usam esse recurso.	19
Tabela 2.2 – Classificação por tamanho de grãos.....	31
Tabela 2.3 – Padrões de condutividade hidráulica de diferentes componentes geológicos.....	31
Tabela 2.4 – Valores representativos de permeabilidade dos solos.....	32
Tabela 2.5 - Níveis aproximados de porosidade dos materiais. ....	33
Tabela 2.6 – Atenuação do sinal eletromagnético / permeabilidade relativa.....	58
Tabela 3.1. – Dados censitários dos municípios de Itaperuna, Miracema e São José de Ubá-RJ (IBGE, 2020). ....	73
Tabela 3.2 – Tipologia climática conforme escala térmica.....	82
Tabela 3.3 – Índice de Qualidade dos Municípios da área de estudo (IQM - VERDE). ....	92
Tabela 3.4 – Área de ocorrência das classes de solo (em km <sup>2</sup> e % da área), por município..	101
Tabela 3.5 – Áreas de estudo e existência de poço cadastrado no SIAGAS.....	105
Tabela 4.1 – Poços não cadastrados no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) obtidos na pesquisa de campo. ....	133

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO .....	14
1. OBJETIVO .....	16
1.1. Objetivo Geral.....	16
1.2. Objetivos Específicos .....	16
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1. Águas subterrâneas.....	17
2.2. Disponibilidade hídrica .....	20
2.3. Qualidade das águas subterrâneas.....	26
2.4. Legislação aplicável às águas subterrâneas .....	27
2.5. Conceitos hidrogeológicos e estruturais relacionados à dinâmica dos recursos subsuperficiais .....	29
2.5.1 Características e propriedades hidrogeológicas e estruturais .....	30
2.5.2. Tipos e classes de solos .....	35
2.5.3. Macropedoambientes.....	40
2.5.4 Classificação de sistemas hidrogeológicos e atributos.....	41
2.5.5 Características quanto à permeabilidade de aquíferos, armazenamento e volumes explotáveis.....	41
2.6. Prospecção de águas subterrâneas.....	44
2.6.1 Métodos geofísicos aplicados na prospecção de água subterrânea.....	44
3. METODOLOGIA .....	69
3.1. Localização das áreas pesquisadas.....	71
3.2. Dados socioeconômicos .....	73
3.3. Aspectos locais .....	80
3.3.1. Clima .....	80
3.3.2. Uso e cobertura do solo .....	85
3.3.3. Geomorfologia .....	86
3.3.4. Vegetação .....	89
3.3.5. Hidrografia.....	92
3.3.6. Geologia.....	96
3.3.7. Solos .....	99
3.3.8. Hidrogeologia .....	101

3.3.9. Poços cadastrados no SIAGAS.....	104
3.4. Métodos geofísicos aplicados na área de estudo como definição de assinaturas e padrões geofísicos.....	105
3.4.1. Eletrorresistividade.....	106
3.4.2. Magnetometria .....	107
3.4.3. Eletromagnético a partir da técnica Ground Penetrating Radar – GPR .....	108
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	111
4.1.1 Campo do Grêmio (distrito sede).....	111
4.1.2. Vilarejo de Santa Maria, área rural, em São José de Ubá-RJ .....	116
4.1.3. Sítio São Domingos em São José de Ubá-RJ .....	120
4.2.1. Areias, distrito de Miracema-RJ .....	123
4.2.2. Montinéia, Miracema-RJ .....	126
4.3.1. Zona rural de Itajara .....	129
5. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES.....	135
REFERÊNCIAS .....	137

## INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural indispensável aos seres vivos. Dos rios provém grande parte da água consumida pela humanidade, para saciar a sede, cozinhar, lavar, irrigar plantações, criar animais, e outros. A sua disponibilidade, tanto superficial como subsuperficial, pode ter alteração devido a eventos de seca ou estiagem e, pelo comprometimento qualitativo de ações antrópicas.

A quantidade e a qualidade das águas superficiais e subterrâneas disponíveis são condicionadas por diferentes variáveis como, o regime de chuvas, o escoamento superficial, a geologia, a cobertura vegetal e demais atividades antrópicas. A água subterrânea torna-se uma opção de suprimento hídrico, especialmente onde a água de superfície apresenta processos de degradação, ou em regiões onde a demanda é significativa, em relação à disponibilidade.

De acordo com a Agência Nacional de Águas (ANA, 2020), a demanda por uso de água no Brasil tem um aumento estimado em aproximadamente 80% no volume extraído dos mananciais nas últimas duas décadas, e a projeção até 2030 sinaliza um acréscimo de 23%. O principal uso de água no país, em termos de quantidade é a irrigação, responsável pela maior parcela das retiradas nos mananciais e por cerca de 66% do volume consumido. Da vazão total extraída de 2083 m<sup>3</sup>/s, cerca de 50% são destinados ao uso agrícola (ANA, 2020).

Em regiões hidrográficas do estado do Rio de Janeiro (ERJ), a disponibilidade de água distribui-se de maneira heterogênea e relaciona-se tanto à diversidade climática e geomorfológica, quanto ao efeito das intervenções antrópicas na dinâmica natural dos cursos hídricos. Esta heterogeneidade, associada à crise hídrica na região sudeste do Brasil, a partir de 2014, com períodos de estiagem prolongada até 2017, motivaram a construção de um pacto entre os estados de São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro e a adoção de uma série de medidas para evitar o desabastecimento de água. No documento, a gestão das águas do rio Paraíba do Sul foi compartilhada entre os três estados, o governo federal e a Agência Nacional de Águas (INEA, 2015).

Segundo o INEA (2018), no estado do Rio de Janeiro, durante a pior crise hídrica de sua história (entre 2014 e 2015), os níveis de reservação de água no conjunto de reservatórios da bacia do Rio Paraíba do Sul foram inferiores a 10%. Mediante o *déficit* hídrico que subsistiu até 2017, o noroeste fluminense sofreu impactos significativos em sua economia, devido às perdas na safra e a morte de animais (EMBRAPA, 2018).

A situação de alta vulnerabilidade decorrente de um balanço hídrico desfavorável exige a aplicação de ações mitigadoras e preventivas para garantir o fornecimento sustentável de água para a população e os ecossistemas. Por isso, a captação de água subterrânea mostra-se uma alternativa viável para o abastecimento em áreas rurais, onde as atividades desenvolvidas, principalmente a agricultura, utilizam os mais elevados volumes de água (ANA, 2018).

A pesquisa de áreas mais favoráveis à presença de água em subsuperfície, com a finalidade de exploração inclui informações disponíveis sobre a região e dados adquiridos nos locais previamente selecionados. Parte destas informações é produzida por meio da aplicação de métodos de investigação indireta do subsolo (geofísicos). Neste trabalho foram utilizados os equipamentos geofísicos de Eletrorresistividade, Magnetometria e Radar de Penetração no Solo - GPR, aptos à geração de dados e perfis, como subsídios da indicação de áreas capazes de prover uma alternativa de abastecimento hídrico nas zonas rurais dos municípios de Miracema, São José de Ubá e sudoeste de Itaperuna, no noroeste fluminense do ERJ. Nesse sentido, contribui-se para a manutenção das atividades agrícola e pecuária na região, com abordagens metodológica e operacional inovadoras de gestão e uso das águas subterrâneas.

## **1. OBJETIVO**

### **1.1. Objetivo Geral**

Avaliar potencialidades de captação de água subterrânea em áreas rurais de municípios da região noroeste do Estado do Rio de Janeiro.

### **1.2. Objetivos Específicos**

Identificar os padrões das assinaturas geofísicas nas áreas potenciais para a presença de água subterrânea;

Indicar as áreas mais favoráveis à captação de volumes de reservas de água subterrânea, como alternativa aos sistemas convencionais de abastecimento;

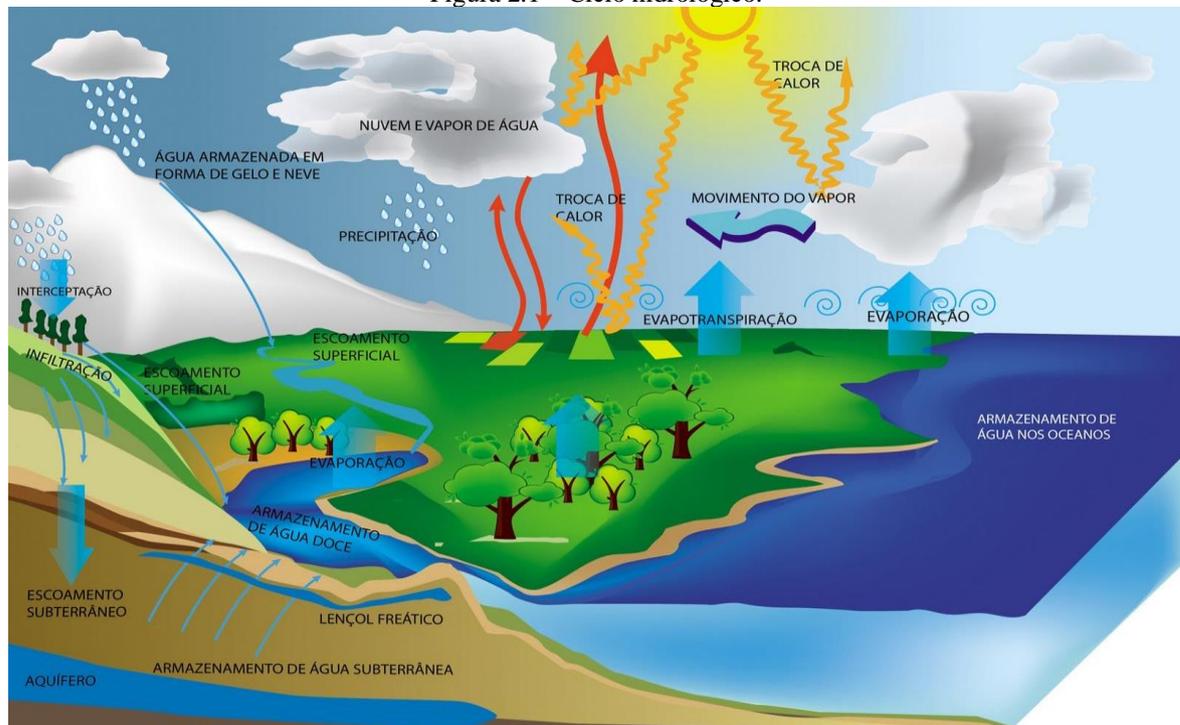
Identificar a localização de poços artesianos não cadastrados pelo Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS/CPRM).

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. Águas subterrâneas

Na natureza a água sofre contínuas mudanças em seu estado físico e circula entre os seres vivos, oceanos, lagos, rios, solos e atmosfera, caracterizando o ciclo hidrológico (Figura 2.1) (NOAA, 2019). A água evapora principalmente devido ao calor produzido pela energia do sol. A neve e o gelo transformam-se em vapor de água em condições de baixa umidade e ventos secos, sem passar pelo estado líquido (sublimação). O vapor eleva-se na atmosfera e ao atingir altitudes com temperatura inferior a da superfície terrestre, condensa-se, formando pequenas gotículas que originam as nuvens. Essas gotículas coalescem e atingem o tamanho e peso suficientes para retornar à superfície no estado líquido (INGLEZAKIS *et al.*, 2016). Quando a temperatura é muito baixa são formados cristais que precipitam como neve, saraiva (< 5 mm) e granizo ( $\geq 5$  mm) (NOAA, 2020). Uma parcela do volume precipitado voltará diretamente aos recursos hídricos superficiais e a outra irá escoar no terreno e percolar nos solos e rochas porosas, cujo excedente irá compor os reservatórios subterrâneos.

Figura 2.1 – Ciclo hidrológico.



Fonte: CANADIAN WATER DIRECTORY (2020).

Nas águas que atravessam os diferentes tipos de solos e rochas, uma fração dos elementos e sais constituintes de suas estruturas faz parte da composição dos recursos subsuperficiais. No mundo, os recursos hídricos são constituídos por águas com diferentes concentrações de sais. As águas doces possuem até 1000 mg/L de sais e as salinas níveis entre 5000 e 35000 mg/L (EPA, 2018). O volume de água salina (oceanos) está estimado em 96,5%. A quantidade de água doce, aproximadamente 1,7% do volume total, está armazenada nas calotas polares, geleiras e neve permanente. O vapor de água na atmosfera representa um milésimo de 1% da água existente na Terra, e os outros 1,7% estão em lagos, rios, córregos, solo e sob a forma de água subterrânea (GRAHAM; PARKINSON; CHAHINE, 2010). Diante deste cenário, a água doce representa por volta de 3% do volume total, sendo apenas 31% acessível para o uso. Portanto, corresponde a cerca de 1% de água disponível (MIASCHI, 2018). Excetuando-se os volumes armazenados nas geleiras, 96% do restante de água doce tem proveniência subterrânea (SMITH *et al.*, 2016).

Em todo o mundo, de acordo com a UNESCO (2012) e SMITH *et al.* (2016), 2,5 bilhões de pessoas utilizam exclusivamente as águas subterrâneas para satisfazer as suas necessidades básicas diárias. Pelo menos 50% da população mundial possui abastecimento potável por águas subsuperficiais, sendo 43% deste recurso utilizado para a irrigação (FAO, 2016; SMITH *et al.*, 2016; WWAP, 2015). Aproximadamente 70% da água subterrânea bombeada no mundo mantêm a atividade agrícola durante os períodos de secas de curto ou longo prazo (DE GRAAF *et al.*, 2019). Na Ásia, estima-se que os sistemas irrigados providos por águas subterrâneas contribuam em US\$ 10 a 12 bilhões/ano para a economia. Quando considerados os ganhos com a venda deste recurso subterrâneo para a irrigação, há o aumento desta estimativa para US\$ 25 a 30 bilhões/ano (WWAP, 2015).

Bangladesh, China, Estados Unidos, Índia, Irã e Paquistão são os países que mais consomem água subterrânea no mundo (UNESCO, 2012). A Tabela 2.1 exhibe os volumes retirados nestes países.

Tabela 2.1 – Volume de água subterrânea retirado pelos países que mais usam esse recurso.

<b>País</b>	<b>Ano</b>	<b>Volume explorado (Km<sup>3</sup>/ano)</b>
Índia	2010	251.00
China	2015	106.90
Estados Unidos	2010	104.90
Paquistão	2017	61.67
Irã	2004	53.10
Bangladesh	2008	28.48

Fonte: FAO - AQUASTAT (2020).

Na Índia, o número de poços tubulares mecanizados aumentou exponencialmente nos últimos 50 anos: em 1960 eram menos de 1 milhão e, na década de 2000, o total foi de 19 milhões (aumento de 1800%), contribuindo amplamente para aliviar a pobreza. Contudo, em algumas áreas, o acréscimo da demanda por irrigação também causou significativo impacto nas águas subterrâneas, exaurindo-os (WWAP, 2015).

Outros países também têm apresentado consequências do declínio acentuado do volume das águas subterrâneas, devido a sua exploração excessiva, como Iêmen, Arábia Saudita, Vietnã, Japão, Irã e China (VAN DER GUN, 2012). Os aspectos relacionados à extração dos recursos hídricos subterrâneos, acima dos limites sustentáveis, podem comprometer ou exaurir a água de seus reservatórios. Os impactos possuem perspectiva de comprometimento quantitativo e qualitativo, podendo, inclusive, afetar os sistemas superficiais dependentes, durante o período de estiagem, da recarga por fluxos subterrâneos. Os principais problemas relacionados à extração excessiva de águas subterrâneas incluem: subsidência da terra, redução do nível freático, contaminação das águas subterrâneas e intrusão da cunha salina<sup>1</sup> nos aquíferos.

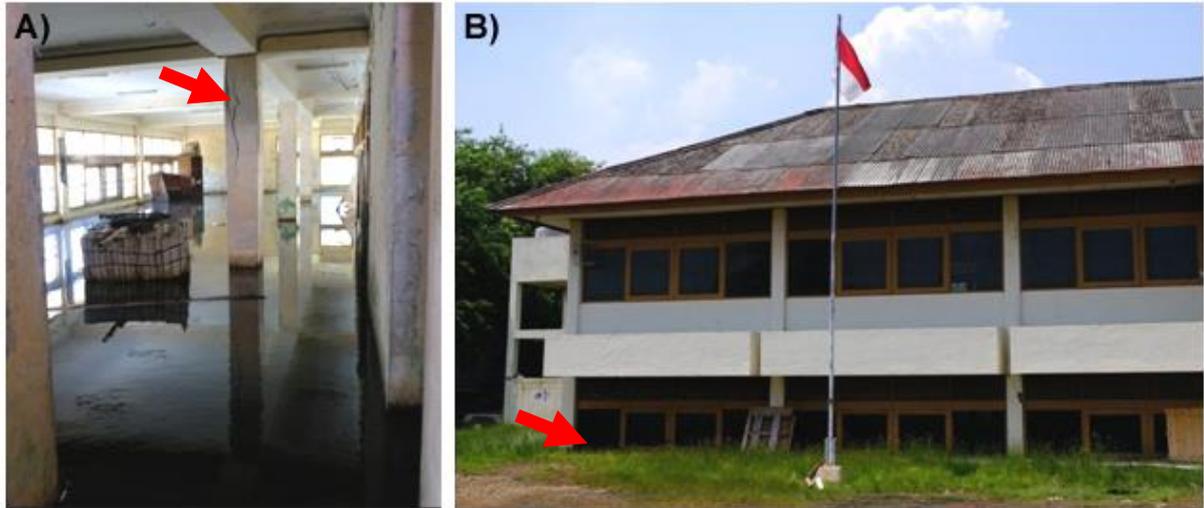
A subsidência do solo resultante da exploração das águas subterrâneas foi observada em cidades como Bangkok (Tailândia), Bandung (Indonésia), Ho chi Minh (Vietnã) e Tóquio (Japão) e ocasionaram, em alguns casos, danos estruturais a construções e à infraestrutura (WWAP, 2015). A cidade de Jacarta, na Indonésia, tem o maior índice de afundamento do

<sup>1</sup> Penetração da água salina, na forma uma cunha, mais grossa na extremidade do mar e afinando para uma camada muito fina no limite da terra, em que há uma mistura mínima entre a água do mar e a água do interior do continente.

Fonte: Encyclopædia Britannica, inc. (2019).

solo no mundo, de modo que a extração excessiva de água do subsolo contribuiu substancialmente no aumento da taxa de subsidência (ABIDIN *et al.*, 2011). As consequências observadas atinentes aos desníveis do solo são os alagamentos, as rachaduras (Figura 2.2A) e o afundamento de estruturas (Figura 2.2A).

Figura 2.2 – Estruturas de edificação comprometida pelo rebaixamento do solo.



Legenda: **A)** Rachadura em pilar na estrutura da construção em Jacarta, Indonésia, comprometida água estagnada no piso sem a devida drenagem. **B)** Parte do pavimento térreo deste edifício tornou-se subterrâneo (Jacarta, Indonésia). As setas indicam a rachadura e o afundamento da estrutura.

Fonte: BBC NEWS (2018).

A exploração exacerbada do recurso hídrico no subsolo ocasiona o decréscimo dos níveis das águas subterrâneas, causando a diminuição dos fluxos para os rios, invertendo a direção ou cessando completamente, com prejuízos significativos aos ecossistemas (GRAAF *et al.*, 2019). Isto ocorre porque as taxas de retirada excedem as de recarga por chuvas e rios, acarretando de maneira substancial a diminuição dos níveis de armazenamento de água subterrânea.

## 2.2. Disponibilidade hídrica

No Brasil, a água provém de fontes superficial e subterrânea. A disponibilidade (vazão total) de água superficial é estimada em 78.600 m<sup>3</sup>/s. Deste total, 65.617 m<sup>3</sup>/s correspondem ao aporte da Bacia Amazônica, onde residem cerca de 5% da população. No entanto, as regiões próximas ao Oceano Atlântico contam com menos de 3% dos recursos hídricos, onde se concentram 45% da população brasileira, evidenciando a desigualdade de distribuição entre os estados da federação (ANA, 2019).

A estimativa da oferta hídrica superficial é efetuada em função das vazões mínimas ou vazões de estiagem. Nos rios federais determina-se a disponibilidade a partir da vazão Q95 (vazão do rio em pelo menos 95% do tempo), das vazões nos lagos de reservatórios e das vazões liberadas a jusante de barragens. Aproximadamente 30% da vazão média está disponível nos rios do país em mais de 95% dos dias, cerca de 63mil m<sup>3</sup>/s na bacia amazônica e 13mil m<sup>3</sup>/s nas demais bacias. Todavia, o quantitativo disponível pode variar nas regiões consoante o regime de chuvas e as características do solo (ANA, 2020).

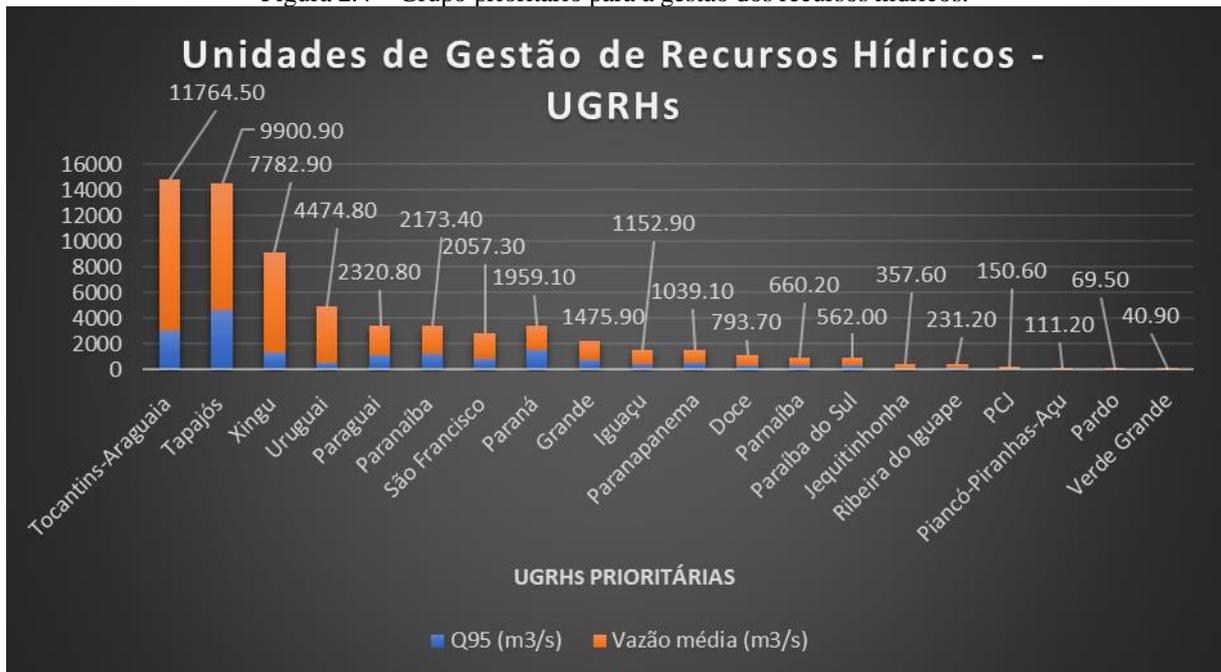
O cenário diferenciado exige um monitoramento hidrológico com informações contínuas sobre a quantidade e qualidade de água. No âmbito do gerenciamento dos aspectos mais relevantes, complexos e de mais pressão aos recursos hídricos foram instituídas 20 UGRHs (Unidades de Gestão dos Recursos Hídricos), cujas localizações constam no mapa da Figura 2.3 e as vazões Q 95 e médias são indicadas no gráfico da Figura 2.4.

Figura 2.3 – Unidades Prioritárias de Gerenciamento dos Recursos Hídricos do Brasil.



Fonte: Modificado de ANA (2020).

Figura 2.4 – Grupo prioritário para a gestão dos recursos hídricos.



Fonte: Modificado de ANA (2020).

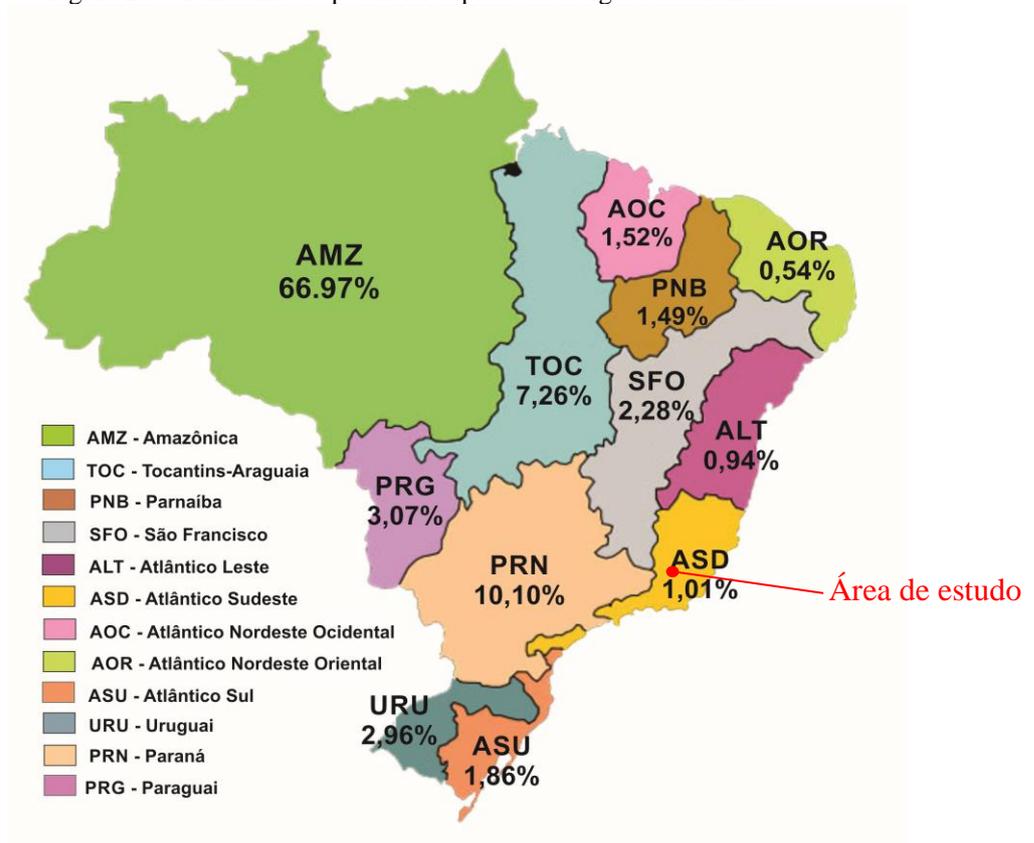
Observa-se no gráfico a grande variação entre as vazões nas UGRHs. Enquanto na UGRH Tapajós, região norte, vazões acima de 4.500 m<sup>3</sup>/s permanecem em 95% do tempo ou mais, nas UGRHs de Piancó-Piranhas-Açu, Pardo e Verde Grande os volumes mantidos em 95% do tempo são inferiores a 10 m<sup>3</sup>/s. Esta desproporção pode gerar disputas pelo uso da água, principalmente quando a oferta é inferior à demanda, especialmente nos grandes centros populacionais (ANA, 2020).

A partir de 2019, a Agência Nacional de Águas avança ser possível suspender outorgas inativas. Este procedimento decorre do esgotamento de fontes com disponibilidade para outorgas de direito de uso de recursos hídricos. Contudo, o órgão gestor salienta que dados dúbios de disponibilidade e demanda, ocasionados por outorgas concedidas e não implantadas ou utilizadas de forma parcial podem gerar incertezas sobre o balanço hídrico legal (legalizado) e a realidade hidrológica da bacia (ANA, 2020).

Em referência à água subterrânea, a estimativa de disponibilidade é de 14.650 m<sup>3</sup>/s (ANA, 2020). A heterogeneidade de distribuição da água superficial também é observada no recurso subterrâneo e fica evidenciada nos índices de potencial explorável (Figura 2.5) (ANA, 2017;2020). As variações dos níveis de água subterrânea podem estar vinculadas às alterações do clima e ao uso e ocupação do solo, influenciando nos elementos coadjuvantes ao processo de recarga e extração de água dos poços (ANA, 2020). Nas regiões hidrográficas, a abundância ou

a escassez de água em subsuperfície dependem de fatores como as características hidrogeológicas e a produtividade dos aquíferos.

Figura 2.5 – Panorama do potencial explorável de água subterrânea.



Fonte: a autora.

As águas subterrâneas representam uma fonte de água estratégica para os diversos usos devido à sua capacidade de armazenamento de grandes volumes em reservatórios e a resiliência a longos períodos de estiagem (ANA, 2017; FIENEN & ARSHAD, 2016). No território brasileiro, aproximadamente 90% dos rios têm o fluxo de base alimentado por aquíferos, mantendo-os com caudal mesmo nos períodos mais secos (ANA, 2017).

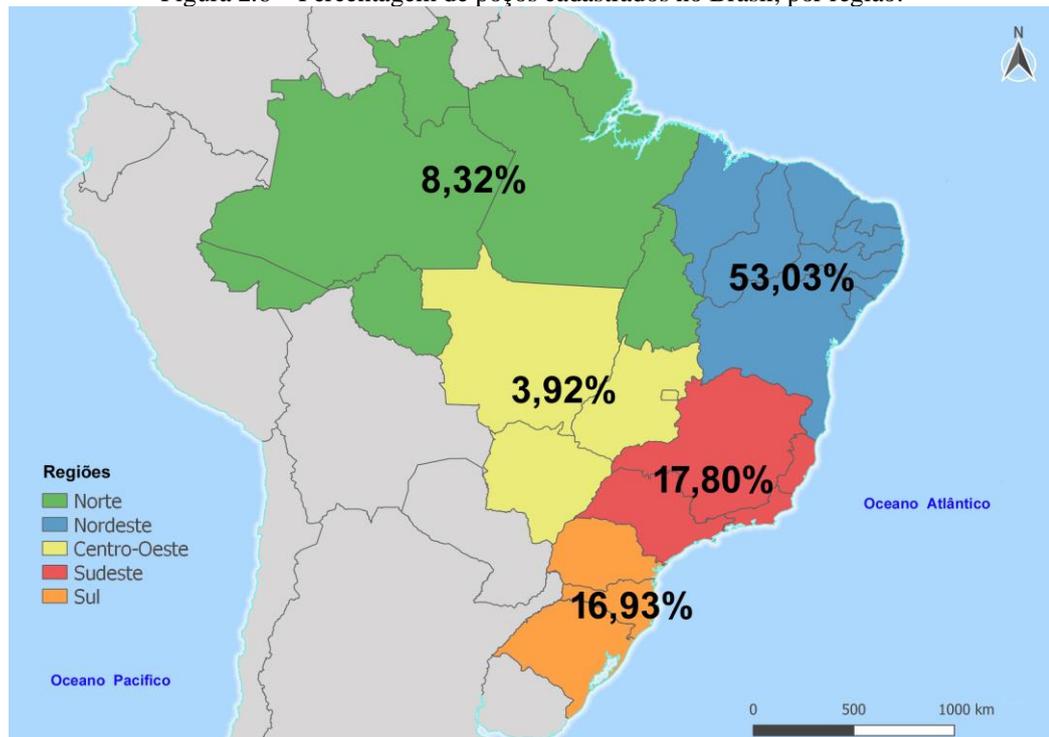
A obtenção de vazões significativas para o abastecimento com água subterrânea usualmente é feita pela perfuração de poços tubulares<sup>2</sup>. Em 2016 os poços cadastrados

---

<sup>2</sup> Poço Tubular: Orifício de acesso à água, realizado por meio de máquinas perfuratrizes à percussão, rotativas e rotopneumáticas. A abertura possui no máximo 50 cm e o revestimento é feito com canos de ferro ou de plástico (CPRM, 1998).

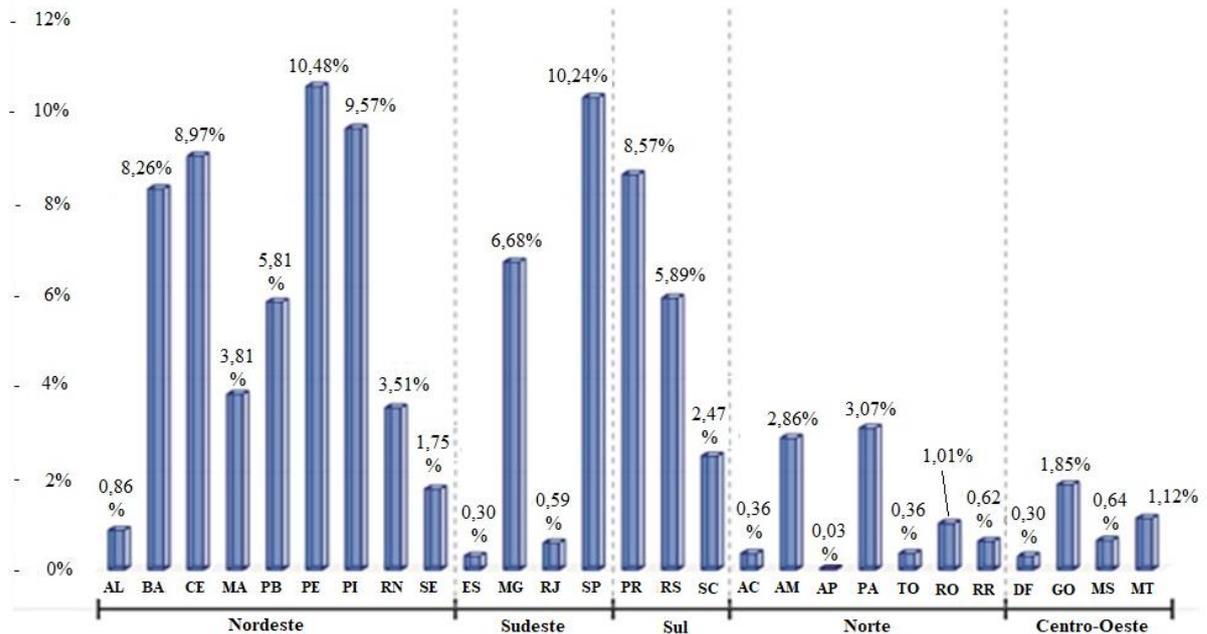
totalizavam 278 mil, cerca de 91,7% a mais do que em janeiro de 2008, quando o número de cadastros era de aproximadamente 145 mil (ANA, 2017) e, em 2020, o total de registros foi de 326.000 (ANA, 2020). No Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS), da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), constavam 333.421 poços cadastrados até janeiro de 2021, distribuídos nos estados de acordo com o mapa da Figura 2.6 e o gráfico da Figura 2.7 (CPRM, 2021).

Figura 2.6 – Percentagem de poços cadastrados no Brasil, por região.



Fonte: a autora.

Figura 2.7 – Distribuição de poços de água cadastrados no país, por estado e no Distrito Federal.



Fonte: a autora.

No entanto, estes registros não refletem a realidade dos volumes explorados e a situação de regularidade desses mananciais. Estimativas da ANA, em 2019, apontavam 2,4 milhões de poços em operação, valor relativamente próximo dos 2,5 milhões indicados por Hirata *et. al* (2019), contudo bem superior aos cerca de 333,5 mil cadastros realizados (13% dos poços em operação).

O abastecimento dos municípios brasileiros provém de recursos hídricos superficiais (58%) e por mananciais subterrâneos (42%) (ANA, 2017). Em situações críticas de suprimento de água, em que há a redução nos índices pluviométricos, os reservatórios subterrâneos são menos vulneráveis a variação dos volumes reservados. No período compreendido entre 2013 e 2017, quando houve uma estiagem severa no Brasil, dos 5.570 municípios brasileiros, 48,6% (2.706) sofreram as consequências da crise hídrica. Deste percentual, a maior parcela 56% (1.518) utilizava o recurso superficial e somente 31% (840) o manancial subterrâneo, ratificando a resiliência dos sistemas de abastecimento que utilizam as águas subsuperficiais nos períodos de estiagem (HIRATA *et. al.*, 2019).

Em relação à disponibilidade desses recursos no país, as regiões que mais sofrem com o estresse hídrico são: Sudeste, Nordeste e Sul. Na região Sudeste as retiradas de água mais expressivas são para o abastecimento humano, irrigação e indústria. No Nordeste, os totais precipitados geralmente ocorrem abaixo da média, ocasionando reduzidas recargas nos reservatórios. Na região Sul, as maiores retiradas de água são destinadas para a irrigação,

portanto, os baixos índices pluviométricos têm impacto direto sobre a agricultura (ANA, 2019). Em áreas rurais dos municípios brasileiros, o suprimento da demanda hídrica para a irrigação por mananciais subterrâneos tem importância econômica e estratégica. A situação estável de disponibilidade hídrica, inclusive em períodos de estiagem, propicia o desenvolvimento das regiões, em especial aquelas com vocação agrícola, e contribui dentre outros fatores, na manutenção das condições de vida da população local.

### **2.3. Qualidade das águas subterrâneas**

A qualidade da água reflete o seu estado natural, físico, químico, ou de alterações provocadas pela ação humana. O uso da água pode ser inviabilizado devido ao comprometimento qualitativo, reduzindo a disponibilidade hídrica.

De acordo com a ANA (2020), monitoramento qualitativo da água subterrânea no Brasil é realizado de maneira incipiente e consiste em alertas qualitativos em uma rede prioritariamente de acompanhamento quantitativo da Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas (RIMAS) da CPRM e em outras redes de forma pontual ou integrada.

A monitorização qualitativa realizada pela RIMAS consiste num sistema de alerta e controle de qualidade com medições anuais dos parâmetros condutividade elétrica, pH, potencial de oxirredução e alguns dos parâmetros mínimos fixados pela resolução CONAMA nº 396/2008 (classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas). No entanto, na instalação do poço de observação e a cada cinco anos serão realizadas coletas para análises físico-químicas completas (relação mínima de 43 indicadores inorgânicos), com inclusão de parâmetros orgânicos voláteis e semivoláteis. As análises também podem ocorrer em qualquer tempo, nos casos em que se verifique, a partir dos padrões indicadores, variação significativa na química da água. Os parâmetros dos ensaios são selecionados conforme as condições de uso e ocupação dos solos nas imediações da estação (CPRM/RIMAS, 2021).

A rede de monitoramento de qualidade das águas subterrâneas é formada por poços tubulares, utilizados em sua maioria para o abastecimento público de água. As redes estaduais no país analisam de 3 a 50 parâmetros, a depender do estado da federação (AGEVAP, 2013).

A Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) realiza o monitoramento de mais de cinquenta parâmetros de qualidade, entre inorgânicos, orgânicos, microbiológicos e bioanalíticos (atividade estrogênica). Em 2019 devido ao seu amplo uso no estado também foram realizadas 58 análises do agrotóxico Glifosato. A contaminação microbiológica é um

dos fatores mais frequentes de alteração da qualidade da água. Coliformes totais, bactérias heterotróficas e *Escherichia coli* foram encontrados em cerca de 5% do total de amostras até 2014. Em 2015 houve aumento do índice de contaminação para 10% e, a partir de 2016, superou 20% do total de amostras. Em 2019, a contaminação microbiológica no estado de SP ocorreu exclusivamente em 51,6% do total analisado (CETESB, 2020).

Segundo a AGEVAP (2013), no estado do Rio de Janeiro, os dados de monitoramento de água subterrânea não estão disponibilizados de modo a compor uma rede estadual e as informações são relacionadas a projetos isolados ou estudos de caso. Em 2014, o Plano Estadual dos Recursos Hídricos - PERHI destacava a necessidade de se ampliar o conhecimento acerca dos recursos subterrâneos, a partir do cadastro de poços. No documento, os registros de contaminação são considerados ocorrências pontuais, em sistemas pouco profundos e na maioria dos casos associados a contaminações por bactérias, nitrato e eventualmente pesticidas e metais pesados. As concentrações elevadas de Al, Ba, Zn, Se e F obtidas nas análises foram apontadas como de possível origem natural (SEA, 2014).

Os aquíferos das camadas mais profundas do subsolo (confinados), apesar de estarem espacialmente em situação mais favorável para a preservação qualitativa da água, a sua recarga advém dos mananciais mais superficiais, em condição mais vulnerável devido às atividades antrópicas. Portanto, exercer o controle da disposição inadequada de resíduos líquidos e sólidos e da aplicação de fertilizantes e pesticidas visa à proteção do recurso subterrâneo.

#### **2.4. Legislação aplicável às águas subterrâneas**

No Brasil, o artigo 20, inciso IX, da Constituição Federal (CF) de 1988 estabeleceu as Águas Minerais como bens minerais, de domínio da União. O artigo 26 da CF definiu as Águas Subterrâneas como bem dos estados, excetuando-se as decorrentes de obras da União. A competência atribuída aos estados para gerir os recursos subterrâneos resultou na demora da criação de diretrizes gerais sobre as águas em subsuperfície (CETESB, 2021).

A carência de orientação e normas gerais no âmbito nacional ficou mais evidente a partir das discussões sobre o Projeto Aquífero Guarani, em 1999 (HAGER; D'ALMEIDA, 2008). Os marcos nesse ramo legislativo ocorreram em 2000, quando foi criada a Câmara Técnica Permanente de Águas subterrâneas do Conselho Nacional de Recursos Hídricos – CNRH e em 2001, com a resolução CNRH nº 15/2001 (HAGER; D'ALMEIDA, 2008); SOUZA; TEIXEIRA; BARBOSA, 2020).

Entre o conjunto de normas jurídicas que podem ser aplicadas às águas subterrâneas estão:

- a) Lei 6.938, de 31 de agosto de 1981- Política Nacional de Meio Ambiente (PNMA), seus fins e mecanismos de formulação e aplicação. O decreto 4.297/2002 - regulamenta o inciso II do art. 9 desta Lei e estabelece critérios para o Zoneamento Ecológico-Econômico do Brasil – ZEE.
- b) Lei 9.433/1997 - Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989, entre outras providências.
- c) Lei 9.605/1998 (Lei de Crimes Ambientais) – Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, entre outras providências, regulamentada pelo decreto n. 3.179/1999.
- d) Lei 9.795, de 1999 – Lei de Educação Ambiental - Dispõe sobre a educação ambiental, institui a Política Nacional de Educação Ambiental, entre outras providências, regulamentada pelo decreto nº 4.281, de 25 de junho de 2002.
- e) Lei 9.985/2000 - Lei do SNUC - Regulamenta o art. 225 § 1, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal/88, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (SNUC), entre outras providências, regulamentada pelo decreto nº 4.340/2002.
- f) Resolução nº 15 de 11/01/2001 / CNRH - Conselho Nacional de Recursos Hídricos (D.O.U. 22/01/2001). Estabelece diretrizes gerais para a gestão de águas subterrâneas.
- g) Resolução nº 22 de 24/05/2002 / CNRH - Conselho Nacional de Recursos Hídricos (DOU 04/07/2002 nº 127, Seção 1, pág. 80) - Estabelece diretrizes para inserção das águas subterrâneas no Instrumento Plano de Recursos Hídricos.
- h) Resolução nº 76 de 16/10/2007 / CNRH - Conselho Nacional de Recursos Hídricos

(D.O.U. 27/11/2007). Estabelece diretrizes gerais para a integração entre a gestão de recursos hídricos e a gestão de águas minerais, termais, gasosas, potáveis de mesa ou destinadas a fins balneários.

Resoluções do Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA:

- i. CONAMA 303/2002 - Dispõe sobre parâmetros, definições e limites de Áreas de Preservação Permanente. No Art. 2º inciso II, a Norma conceitua as nascentes como exutório de águas subterrâneas. De acordo com o Ministério do Meio Ambiente (MMA), a resolução é aplicável até o julgamento de mérito da ADPF (Arguição de Descumprimento de Preceito Fundamental) nºs 747, 748 e 749.
- ii. CONAMA 335/2003 – “Dispõe sobre o licenciamento ambiental de cemitérios”.
- iii. CONAMA 396/2008 - Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento de águas subterrâneas, entre outras providências.
- iv. CONAMA 420/2009 - Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas.
- v. CONAMA 430/2011 - Complementa e altera a Resolução nº 357/2005 e dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes.

## **2.5. Conceitos hidrogeológicos e estruturais relacionados à dinâmica dos recursos subsuperficiais**

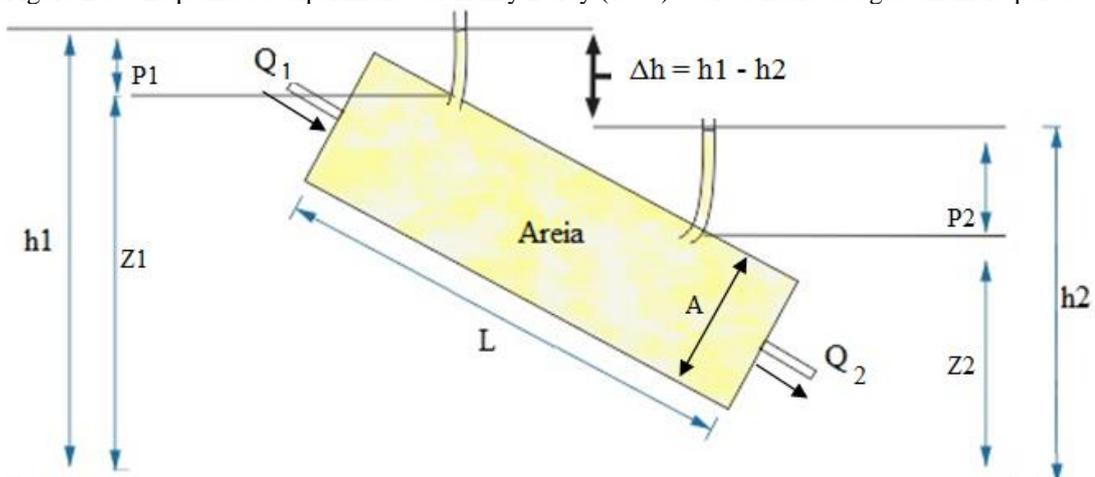
A Hidrogeologia abrange o estudo do movimento e armazenamento de água, o que faculta o mapeamento e a quantificação da água em aquíferos subterrâneos e, por vezes, em sistemas de superfície. Os instrumentos e mecanismos usados na pesquisa permitem identificar os movimentos de fluxo e recarga (regime hidrodinâmico), e avaliar a composição química e a qualidade da água em subsuperfície, como as suas características hidrogeoquímicas (NATURE, 2020).

### 2.5.1 Características e propriedades hidrogeológicas e estruturais

A dinâmica e os diferentes aspectos dos recursos hídricos subsuperficiais são resultantes dos volumes precipitados, da topografia e das características do solo e das rochas. A água subterrânea se move na direção descendente do gradiente hidráulico, ou seja, o movimento do fluxo acontece dos locais mais elevados para os de menos altitude e das zonas com mais pressão para as com níveis inferiores de pressão. A pesquisa sobre o fluxo de água através de sedimentos, realizada pelo engenheiro hidráulico Henry Darcy (1803-1858) em 1856 foi precursora dos trabalhos sobre a quantidade e o deslocamento das águas subterrâneas.

As pesquisas conduzidas por Darcy investigaram o sistema de abastecimento de água em sua cidade natal, Dijon (França), de modo que os resultados observados demonstraram que a qualidade da água melhorava ao fluir por grandes leitos de areia. Este fato levou-o a ampliar a pesquisa e a montar um experimento com leitos de areia, em escala laboratorial, no qual examinava como os grãos influenciavam o fluxo da água. O ensaio (Figura 2.8) consistia em atravessar a água por um cilindro ou coluna em um meio poroso e com uma área de seção transversal conhecida (THUSYANTHAN; MADABHUSHI, 2003). Os experimentos realizados indicaram que o fluxo de água é diretamente proporcional à área ( $A$ ) da secção transversal por onde flui, diretamente proporcional à diferença entre os níveis ( $h_1$  e  $h_2$ ) e, inversamente proporcional ao comprimento ( $L$ ), resultando na formulação da Lei de Darcy (LANDMEYER, 2011). O trabalho pioneiro de Darcy, em condutos fechados, forma a base científica da permeabilidade dos fluidos nas ciências da terra, particularmente na hidrogeologia aplicada às águas subterrâneas.

Figura 2.8 – Esquema do experimento de Henry Darcy (1956) sobre o fluxo de água em meio poroso.



Fonte: Adaptado de LANDMEYER (2011).

Na areia e em cascalhos, principalmente em função das dimensões dos grãos (Tabela 2.2), as águas fluem de maneira relativamente rápida, enquanto em argila ou em pequenas fraturas de rochas o fluxo é extremamente lento. A esta capacidade do material geológico em permitir o deslocamento das águas subterrâneas (permeabilidade) se atribui o conceito de condutividade hidráulica.

Tabela 2.2 – Classificação por tamanho de grãos.

Componentes	Tamanho da Partícula (mm)
Pedras	63 a 200
Cascalho	2,0 a 63
Areia	0,063 a 2,0
Silte	0,002 a 0,063
Argila	≤ 0,002

Fonte: ISO 14688-1 (2017).

A condutividade hidráulica depende do meio e do fluido que o percola e pode ser afetada, por exemplo, na medida em que o solo está pouco coeso ou compactado, ou de acordo com a conexão de fraturas em rochas. Alguns intervalos de referência do grau de permissividade à percolação de fluidos constam na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Padrões de condutividade hidráulica de diferentes componentes geológicos.

Sedimentos	Condutividade Hidráulica	
	cm/s	m/s
Areia (granulometria média)	$9 \times 10^{-5}$ a $5 \times 10^{-2}$	$9 \times 10^{-7}$ a $5 \times 10^{-4}$
Silte	$1 \times 10^{-7}$ a $2 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-9}$ a $2 \times 10^{-5}$
Argila	$1 \times 10^{-9}$ a $4.7 \times 10^{-7}$	$1 \times 10^{-11}$ a $4.7 \times 10^{-9}$
Rochas Sedimentares	Condutividade Hidráulica	
	cm/s	m/s
Rocha calcárea, Dolomito	$1 \times 10^{-7}$ a $6 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-9}$ a $6 \times 10^{-6}$
Arenito	$3 \times 10^{-8}$ a $6 \times 10^{-4}$	$3 \times 10^{-10}$ a $6 \times 10^{-6}$
Siltito	$1 \times 10^{-9}$ a $1.4 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-11}$ a $1.4 \times 10^{-8}$
Xisto	$1 \times 10^{-11}$ a $2 \times 10^{-7}$	$1 \times 10^{-13}$ a $2 \times 10^{-9}$

Rochas Cristalinas	Condutividade Hidráulica			
	cm/s		m/s	
Basalto permeável	$4 \times 10^{-5}$	a $2 \times 10^0$	$4 \times 10^{-7}$	a $2 \times 10^{-2}$
Rocha ígnea e metamórfica fraturada	$8 \times 10^{-7}$	a $3 \times 10^{-2}$	$8 \times 10^{-9}$	a $3 \times 10^{-4}$
Granito intemperizado	$3.3 \times 10^{-4}$	a $5.2 \times 10^{-3}$	$3.3 \times 10^{-6}$	a $5.2 \times 10^{-5}$
Gabro intemperizado	$5.5 \times 10^{-5}$	a $3.8 \times 10^{-4}$	$5.5 \times 10^{-7}$	a $3.8 \times 10^{-6}$
Basalto	$2 \times 10^{-9}$	a $4.2 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-11}$	a $4.2 \times 10^{-7}$
Rocha ígnea e metamórfica não fraturada	$3 \times 10^{-12}$	a $2 \times 10^{-8}$	$3 \times 10^{-14}$	a $2 \times 10^{-10}$

Fonte: Adaptado de DOMENICO; SCHWARTZ (1990).

Informações sobre a aptidão do material geológico em transmitir fluidos são imprescindíveis na determinação dos fluxos de água no subsolo e em aquíferos. A permeabilidade específica ou intrínseca de um material relaciona-se a sua porosidade, granulometria e disposição estrutural. A Tabela 2.4 exhibe a classificação referente aos índices dos coeficientes de permeabilidade e as ordens de grandeza de diferentes constituintes dos solos. O Quadro 2.1 apresenta a classificação desses índices e os mecanismos envolvidos na produção de vazões, considerando determinados tipos de rocha.

Tabela 2.4 – Valores representativos de permeabilidade dos solos.

Tipo de solo	Índice de permeabilidade	Permeabilidade	
		cm/s	m/s
Cascalhos	Alto	$>1 \times 10^{-1}$	$> 1 \times 10^{-3}$
Arenoso e misturas de areia/cascalho	Alto a moderado	$1 \times 10^{-1}$ a $5 \times 10^{-2}$	$1 \times 10^{-3}$ a $5 \times 10^{-4}$
Arenoso (granulometria fina a média)	Moderado a Baixo	$5 \times 10^{-2}$ a $1 \times 10^{-2}$	$5 \times 10^{-4}$ a $1 \times 10^{-4}$
Areno-siltoso	Baixo	$1 \times 10^{-2}$ a $1 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-4}$ a $1 \times 10^{-6}$
Silte-arenoso, Areias finas siltosas e laminadas ou estratos mistos de silte/areia/argila	Baixo a Muito Baixo	$1 \times 10^{-3}$ a $1 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-5}$ a $1 \times 10^{-8}$
Argiloso fissurado ou laminado	Muito Baixo	$1 \times 10^{-5}$ a $1 \times 10^{-7}$	$1 \times 10^{-7}$ a $1 \times 10^{-9}$
Argiloso intacto	Praticamente impermeável	$<1 \times 10^{-7}$	$<1 \times 10^{-9}$

Fonte: CASHMAN; PREENE (2013).

Quadro 2.1 – Elementos predominantes para os mecanismos de vazão e classificação dos índices de permeabilidade.

Litologia	Mecanismo Predominante	Fluxo	
		Permeabilidade Máxima	Permeabilidade Mínima
Calcário	Fratura	Muito Alta	Moderada
Arenito	Misto	Alta	Baixa
Argilito	Fratura	Baixa	Muito Baixa
Granito	Fratura	Moderada	Baixa
Traquito	Fratura	Moderada	Baixa
Gnaisse	Fratura	Moderada	Baixa

Fonte: Adaptado de LEWIS; CHENEY; ÓDOCHARTAIGH (2006).

Os níveis de porosidade (Tabela 2.5) são proporcionais aos espaços ou poros existentes. Nos leitos rochosos ocorrem como fraturas e/ou dutos; estes últimos, resultantes da dissolução química ou de percolação de água na estrutura da rocha a partir das fendas existentes. A porosidade é expressa pela razão entre o volume de vazios e o volume total (GE; GORELICK, 2015). Quando decorrente de processos que aconteceram durante a formação da rocha é denominada primária, enquanto a porosidade devido a processos que ocorrem após a formação da rocha, por fraturamento ou falhamento, nomeia-se secundária (THOMSON; PETFORD, 2008; KARMANN, 2008). Por exemplo, em depósitos onde minerais mais solúveis estejam contidos dentro um mineral duro, o material mais friável, que se fragmenta mais facilmente, pode ser gradualmente dissolvido ao longo do tempo, tornando a rocha mais porosa.

Tabela 2.5 - Níveis aproximados de porosidade dos materiais.

Sedimentos	Porosidade (%)
Areia e cascalho misturados	20 a 35
Silte	35 a 50
Argila	34 a 60
Rochas Sedimentares	Porosidade (%)
Dolomito	3 a 5
Arenito	5 a 30
Calcário	0.5 a 17
Xisto	0 a 10

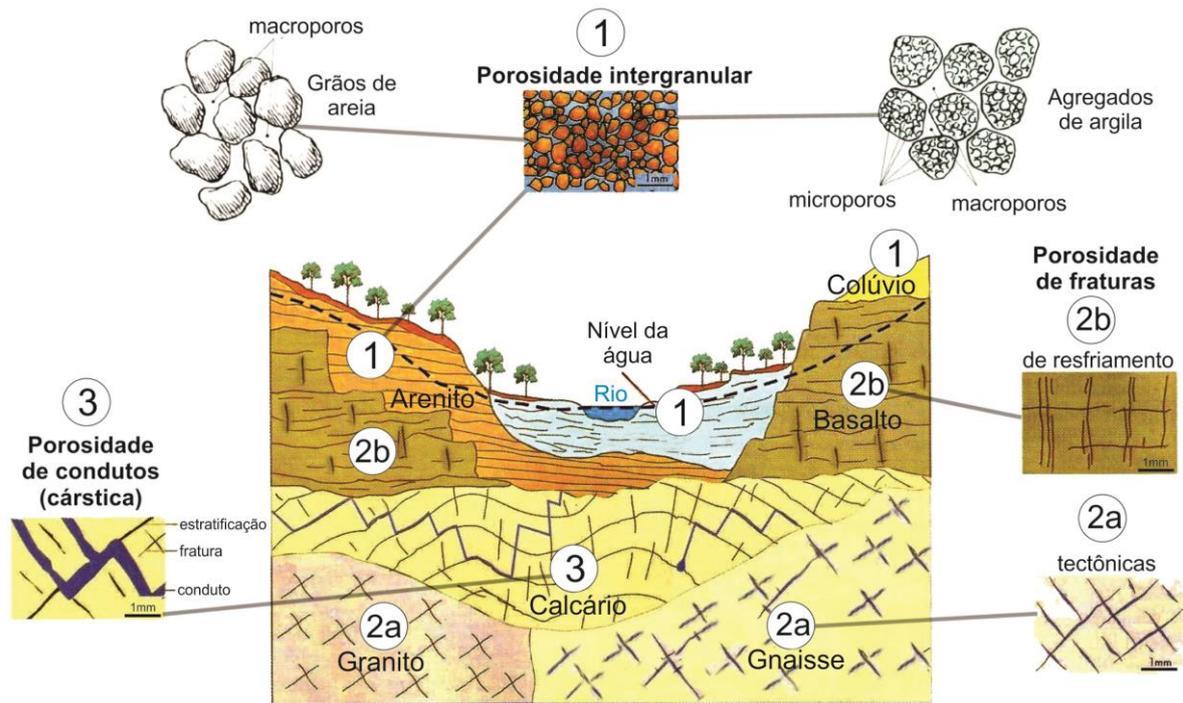
Rochas Cristalinas	Porosidade (%)
Basalto	0.1 a 12
Basalto fraturado	5 a 15
Rochas cristalinas fraturadas	0 a 10
Rochas cristalinas densas	0 a 5
Granito	0.02 a 15

Fonte: ZEKÂI ŞEN (2015).

Estas características das formações geológicas possibilitam o armazenamento de fluidos em seus poros. Em situações em que a porosidade está entre 1 a 10%, significa que um metro cúbico de rocha contém em torno de 10 a 100 litros de água (LACHASSAGNE, 2019). Contudo, esta perspectiva não indica que possa haver fluxo, pois isto dependerá da conectividade entre os espaços intergranulares e/ou da permeabilidade dos componentes geológicos.

Os poros são classificados de micro a macroporos. O volume dos poros quase sempre é inversamente proporcional ao diâmetro das partículas. A exceção são os solos orgânicos ou turfosos, por terem elevados índices de porosidade e a sua textura ser mais fina. Geralmente, os menores índices de porosidade correspondem aos solos de textura mais grosseira e, os mais altos, aos de textura mais fina. Os macroporos são os espaços maiores, onde a água transita e percola pela ação da gravidade. Os microporos usualmente estão localizados dentro dos agregados ou elementos estruturais (Figura 2.9).

Figura 2.9 – Diagrama dos tipos de porosidade e estruturas dos poros.



Fonte: Adaptado de KARMANN (2008).

Em razão da pequena dimensão, os microporos têm a capacidade de reter e armazenar água devido à capilaridade, sendo eficazes em manter a umidade (RANZANI, 1969). Estes aspectos correlatos são fundamentais na identificação de estruturas, mecanismos de infiltração, difusão e no armazenamento de água em subsuperfície.

A estrutura uniforme ou rigidamente organizada de um solo tem alta capacidade de retenção de água, no entanto, menor capacidade de transmissão ou mobilidade (permeabilidade). Os solos que possuem níveis acentuados de porosidade (macroporos) e de permeabilidade elevados, em geral, têm o suficiente para prover quantidades significativas de água em subsuperfície (EASTON; BOCK, 2016), o que contribui para a manutenção da vazão de poços e mananciais.

### 2.5.2. Tipos e classes de solos

A pedogênese, como origem e evolução dos solos, ocorre por intermédio da dinâmica complexa de fatores físicos e biológicos, com a participação de agentes como: a chuva, o vento, o gelo, a temperatura e os organismos vivos. Os solos são formados a partir da decomposição de rochas e possuem múltiplas funções, incluindo a ciclagem de nutrientes e a serventia como substrato para as plantas; a distribuição, o escoamento, a infiltração e o

armazenamento da água da chuva; a ação filtrante e protetora da qualidade da água; entre outras.

Os solos expressam as características dos materiais que o originaram e as suas camadas são denominadas horizontes. Os predicados de cada horizonte de solo, atribuídos pelo IBGE (2015) são apresentados na Figura 2.10. O número de camadas é proporcional ao seu grau de desenvolvimento. Um solo não muito evoluído tem poucas camadas/horizontes, enquanto um solo bastante desenvolvido é profundo e mais estruturado (mais estratos).

Figura 2.10 – Perfil de horizontes de solo e características de camadas subsuperficiais.



		Características
Horizonte	O	Horizonte de constituição orgânica.
	A	Camada com características definidas em função da concentração de matéria orgânica decomposta e dos componentes minerais
	E	Horizonte onde as argilas, óxidos de ferro e alumínio ou matéria orgânica foram movidos pelas águas para as camadas subjacentes, resultando na sua descoloração e na concentração residual de areia e silte.
	B	Horizonte de acumulação de argila, Fe, Al, Si, húmus, CaCO <sub>3</sub> , CaSO <sub>4</sub> e outros elementos advindos das camadas sobrejacentes.
	C	Camada de material inconsolidado e relativamente pouco afetado por processos pedogenéticos.
	R	Horizonte de material consolidado, podendo apresentar poucas e estreitas fendas.

Fonte: a autora.

Os aspectos gerais das camadas de solo em um perfil são (EMBRAPA, 2018):

- Horizonte O - possui matriz orgânica (resíduos de material vegetal ou animal) e os horizontes A, E, B e C são de constituição mineral.
- Horizonte A – a relação mais elevada entre a matéria orgânica e a atividade biológica no horizonte A usualmente estabelece uma cor mais escura para esta camada em relação às demais;
- Horizonte E - de maneira geral é o mais claro, devido à perda de argila, ferro, alumínio e material orgânico, lixiviados para as camadas subjacentes;

- Horizonte B - onde os materiais advindos das camadas superiores são acumulados, as cores são mais intensas e o processo pedogenético é mais acentuado;
- Horizonte C ou saprolítico - representa a zona de transição entre o solo e a sua rocha formadora, contendo alguns sedimentos maiores e menos decompostos
- Horizonte R – constitui-se de rocha sã ou com poucos indícios de processo inicial de intemperização.

A cor do solo é uma característica morfológica que pode indicar algumas particularidades a serem reconhecidas de forma imediata como, por exemplo, o conteúdo de matéria orgânica, a presença de óxidos de ferro e de minerais que compõem a argila, e o processo de gleização, como modificações sofridas pelos óxidos de ferro existentes no solo; em função das condições de saturação por água etc (EMBRAPA, 2018).

A textura de um solo é determinada pela proporção relativa entre as partículas sólidas. Em conformidade com esses aspectos são derivadas as categorias de textura:

- arenosa: teor de areia de mais de 70% (classes texturais de areia e areia franca);
- média: material com teor de argila inferior a 35% e teor de areia superior a 15%, excluídas as classes texturais de areia e areia franca;
- argilosa: material com teor de argila entre 35% e 60%;
- muito argilosa: material com teor de argila superior a 60%;
- siltosa: material com teor de argila inferior a 35% e; teor de areia com menos de 15%.

A quantidade de silte é determinada pela diferença entre a quantidade de areia e a quantidade de argila (EMBRAPA, 2018). A textura tem ampla influência na drenagem dos solos. Os solos arenosos são mais eficazes na transmissão da água, portanto, com pouca aptidão para a retenção de umidade devido à elevada porosidade. Os solos argilosos são propensos a formar agregados com substancial volume de microporos, os quais possuem capacidade de retenção de grande quantidade de água, por capilaridade. No entanto, a expansão e contração das partículas devido ao umedecimento e ressecamento dos solos pode favorecer a formação de espaços (macroporos) entre os agregados de argila, permitindo a infiltração e o fluxo em subsuperfície (EMBRAPA, 2018).

A classificação de um solo é feita por intermédio da avaliação dos dados morfológicos, físicos, químicos e mineralógicos do perfil averiguado. As classes são

determinadas de acordo com os atributos que satisfaçam as condições de um mesmo nível de generalização. Na definição de um nível categórico são observadas as propriedades dos solos identificadas no campo ou inferidas de outras propriedades também reconhecidas no campo, e pela compreensão de aspectos sobre a pedologia, edafologia (estudo dos solos sob a perspectiva de sua influência nos seres vivos) e elementos correlatos.

O enquadramento dos solos de forma sistemática permite a distinção das características intrínsecas de sua gênese, cujas informações são necessárias para o manejo sustentável e o entendimento global acerca dos atributos que influenciam na dinâmica do fluxo de água. Este conhecimento é essencial na pesquisa das potencialidades hidrológicas na área pesquisada.

Na área de estudo são encontrados afloramentos rochosos, cujas superfícies podem conter uma fina espessura de materiais decompostos, que consistem em solos incipientes (EMBRAPA, 2018). A seguir são apresentadas as classificações de solo presentes nas áreas de estudo:

#### a) Cambissolo háplico

Os cambissolos pertencem ao grupamento de solos pouco desenvolvidos, constituídos por elementos minerais com horizonte B incipiente. Em função da diversidade do material de origem, das condições climáticas locais e do relevo, apresenta variações que podem abranger os níveis de drenagem (alta ou baixa), a espessura (solos rasos ou profundos), a saturação por bases e a textura (EMBRAPA, 2018).

Na área de estudo esta classe ocorre na divisa entre os municípios de Miracema e Laje do Muriaé (EMBRAPA, 2003), com feições de pequenas rampas suaves colúvio-aluvionares, sobretudo perto das cabeceiras de drenagem e nas áreas que margeiam as planícies de inundação (LUMBRERAS, 2008).

#### b) Gleissolo háplico

Os gleissolos são categorizados como hidromórficos (com excesso de umidade), desenvolvidos a partir de sedimentos recentes não consolidados, com composição argilosa, argilo-arenosa e arenosa. Desenvolvem-se nas proximidades dos cursos d'água, em áreas de relevo plano de terraços fluviais, lacustres ou marinhos; em áreas abaciadas e depressões. As características destes solos são influenciadas pela contribuição de partículas provenientes dos

solos das posições mais altas, tendo em vista a sua localização em baixadas, próximo às drenagens. A água se mantém estagnada internamente ou a saturação acontece por fluxo lateral no solo (EMBRAPA, 2018) Possuem boa fertilidade, contudo, em decorrência de sua drenagem interna deficiente, há limitação para o uso agrícola, servindo apenas às culturas que requerem condições de inundação (CALDERANO *et al.*, 2006).

c) Latossolo vermelho-amarelo

Possuem avançado estágio de intemperização (solos evoluídos), isentos de minerais primários ou secundários. Variam de fortemente a bem drenados, embora possam ocorrer de maneira menos expressiva os solos de drenagem moderada e os imperfeitamente drenados. De modo geral são muito profundos, com espessura dos perfis A + B raramente inferior a 1 m (EMBRAPA, 2018). As propriedades químicas dos níveis mais rasos impõem limitações ao desenvolvimento do sistema radicular da vegetação, se os estratos apresentarem caráter álico (baixíssimo potencial nutricional abaixo da camada arável), distrófico (pouco fértil) ou árico (qualidade do solo muito intemperizado, resultando em ressecamento devido à microagregação da argila) (EMBRAPA, 2018). Na área deste estudo predominam os latossolos com pouca fertilidade e grande espessura do manto de alteração (LUMBRERAS, 2008).

d) Argissolo vermelho / argissolo vermelho-amarelo

São constituídos por material mineral com a presença de horizonte B textural e atividade de argila (capacidade de troca de cátions) alta ou baixa, desde que associada à saturação por bases baixa ou com caráter alumínico (EMBRAPA, 2018). Destacam-se o gradiente textural e a nítida separação entre os horizontes. A textura pode variar de arenosa a argilosa no horizonte A e de média a muito argilosa no horizonte B textural.

Em locais cujo gradiente textural é acentuado torna-se muito susceptível à erosão. Quando a textura é média/argilosa e argilosa esses solos são indicados para o desenvolvimento de atividades agrícolas devido à boa capacidade de retenção de água e reserva de minerais (EMBRAPA, 2018), variando de forte a imperfeitamente drenados. Na área de estudo, esta classe de solo exhibe caráter latossólico e ocorre com mais frequência no terço médio a superior das encostas (LUMBRERAS, 2008).

Em geral possuem pequena diferença textural, favorecendo a infiltração de água no terreno e estabelecendo uma capacidade elevada de armazenamento de água e recarga de aquíferos, o que contribui para a manutenção da vegetação natural e perenidade de córregos e riachos (LUMBRERAS, 2008).

### 2.5.3. Macropedoambientes

Lumbreras *et al.* (2004) identificaram e caracterizaram os atributos físicos e bióticos do Noroeste Fluminense, definindo três macropedoambientes, denominados de 1, 2 e 3. Estes atributos incluem as relações solo-paisagem, fase de vegetação natural, ravinamento, geomorfologia e qualidade do solo.

No município de Miracema predominam os macropedoambientes 2 e 3, em que os autores ressaltam as condições de fertilidade natural dos solos (moderada a baixa), constituído por solos distróficos e a capacidade de retenção de água (baixa a média). As elevadas espessuras, permeabilidade e estabilidade destes solos são reconhecidas como fatores contribuintes de redução da susceptibilidade à erosão e auxiliam na manutenção de uma natureza menos decídua da vegetação destes ambientes em relação ao Macropedoambiente 1, face à existência de um período seco (4 a 6 meses) no ano.

Na área rural de Miracema (no distrito de Venda das Flores) as parcelas do território atribuídas ao Macropedoambiente 3 são caracterizadas por precipitações pouco superiores aos demais Macropedoambientes, permitindo uma melhor cobertura de vegetação. Nesses locais, devido ao regime pluviométrico, a floresta exhibe caráter subperenifólio. A elevada permeabilidade do solo, as áreas mais extensas de florestas e o clima menos seco, aumenta o volume de água percolado, abastecendo os aquíferos e elevando o número de córregos e riachos perenes em relação aos Macropedoambientes 1 e 2 (LUMBRERAS *et al.*, 2004).

Nos municípios de São José de Ubá e Itaperuna prevalecem as condições pertinentes ao Macropedoambiente 1, onde os solos majoritariamente possuem elevada fertilidade natural e capacidade de disponibilidade de água variando de média a baixa, em decorrência do acentuado gradiente textural. A topografia é bastante diversa e atua como agente condicionante das características dos solos. O período seco (4 a 6 meses), com precipitação inferior a 60 mm, confere à vegetação original deste ambiente (floresta tropical subcaducifólia), um caráter proeminente de perda de folhas nos períodos de estiagem. Estes aspectos conjugados de deficiência de pluviosidade, baixa capacidade de armazenamento de água dos solos, acentuado índice de desmatamento e elevado escoamento superficial

acarretam a existência mais expressiva de córregos e riachos temporários, repercutindo na diminuição expressiva da vazão dos rios principais e na recarga dos aquíferos (LUMBRERAS *et al.*, 2004).

#### 2.5.4 Classificação de sistemas hidrogeológicos e atributos

Os componentes dos sistemas hidrogeológicos, classificados de acordo com as suas propriedades e atributos recebem as seguintes designações (RAJAPAKSE, 2016; CPRM 2008; ZEKÂI ŞEN 1995):

**a) Aquífugo:** estrutura impermeável incapaz de transmitir e armazenar a água (e.g. basalto e granito, sem fraturas);

**b) Aquíardo:** estrutura capaz de armazenar volumes de água, porém, transmite lentamente, inviabilizando o seu aproveitamento para a locação de poços (*e. g.* argilas, xistos)

**c) Aquíclode:** estrutura geológica que, apesar de poder armazenar a água devido a sua porosidade alta, possui permeabilidade quase nula, em outros termos, não permite que a água circule (*e. g.* rochas submetidas a intensos processos de compactação/cimentação, impedindo a comunicação entre os poros). Camadas de material argiloso também se comportam como aquíclode, pois possuem alta microporosidade e baixíssima permeabilidade. Neste caso a água não consegue fluir porque os diâmetros dos poros são muito pequenos e a força de atração entre as moléculas de água e as partículas argilosas é suficiente para evitar a ação da força de gravidade, tornando a porosidade efetiva muito baixa (CPRM, 2008).

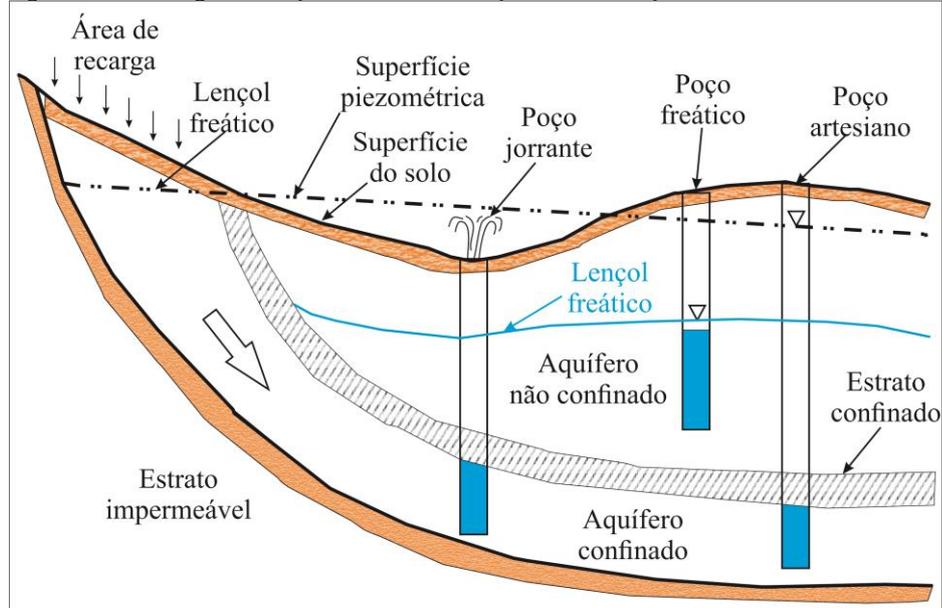
**d) Aquífero:** formação geológica com alta permeabilidade e capaz de transmitir e armazenar água entre os espaços porosos, contatos e/ou fraturas de rochas. Os volumes de água acumulados dependem do arranjo e da geometria dessas estruturas. As fontes que abastecem os aquíferos podem ser oriundas do escoamento superficial, da infiltração de precipitações na subsuperfície e a partir de rios, córregos, lagos etc.

#### 2.5.5 Características quanto à permeabilidade de aquíferos, armazenamento e volumes explotáveis.

Os recursos hídricos subsuperficiais, em função da pressão das águas nas suas superfícies limítrofes e da capacidade de transmissão de água das respectivas camadas são classificados em: aquíferos não confinados (livres ou freáticos) e confinados ou sob pressão. No aquífero não confinado, o limite superior da superfície aquática ou freática está ao nível da pressão atmosférica. Na prática, considera-se o nível em que a água fica no topo de um poço

que intercepta o aquífero. A área de recarga de aquíferos não confinados normalmente é ampla e abrange toda a sua extensão, contudo, pode haver redução dos volumes percolados em locais revestidos por material de baixa permeabilidade. O limite inferior do aquífero livre é composto por rochas impermeáveis ou semipermeáveis, porém, estas últimas podem contribuir na recarga do aquífero confinado (Figura 2.11).

Figura 2.11 – Diagrama esquemático dos componentes de aquíferos livres e confinados.



Fonte: TODD (1980).

Aquíferos confinados ocorrem onde as águas subterrâneas ficam localizadas entre camadas impermeáveis ou semipermeáveis. A pressão em seu topo possui um potencial maior que a pressão atmosférica. O gradiente hidráulico formado conduz a água acima do fundo do leito confinado ao nível da superfície potenciométrica ou piezométrica. A recarga desses tipos de aquíferos pode ser efetuada por intermédio de aquíferos subjacentes ou através do seu leito confinante sobreposto, contudo, a maior parcela de sua recarga provém das partes não confinadas do aquífero. Em função das camadas limítrofes pode ser definido como: confinado, não drenante (as duas camadas de confinamento impermeáveis) e confinado drenante (uma das camadas semipermeável) (HOLLIS *et al.*, 2002)

Os volumes exploráveis de água subterrânea variam em função da matriz do sistema. Os depósitos de água ocorrem em rochas sedimentares consolidadas (*e.g.* arenito, calcário, argilito, conglomerado); em sedimentos inconsolidados e solos arenosos decompostos *in situ*; e em fraturas de rochas ígneas (*e.g.* basalto, gabro, granito) e metamórficas (*e.g.* paragnaisse, ardósia, mármore).

As categorias de aquíferos relativas aos elementos constituintes do reservatório são (CPRM, 2008):

**i) Aquíferos Porosos:** estes aquíferos ocorrem nas bacias sedimentares e em sedimentos inconsolidados e solos arenosos decompostos *in situ*. Constituem os mais expressivos aquíferos, pelo grande volume de água que armazenam, e por sua ocorrência em grandes áreas. A porosidade do meio físico quase sempre é isotrópica ou homogênea, em todas as direções, permitindo que a água escoe apenas em função dos diferenciais de pressão hidrostática.

**ii) Aquíferos Fraturados ou Fissurados:** as matrizes são as rochas ígneas e metamórficas. Os volumes de água acumulados relacionam-se à quantidade de fraturas, extensão e profundidade de suas aberturas e intercomunicação. A produtividade do poço dependerá da interceptação de fraturas capazes de armazenar água. Essas fraturas tendem a ter orientações preferenciais, por este motivo, a porosidade do meio físico é denominada anisotrópica.

**iii) Aquíferos Cársticos:** formados em rochas carbonáticas. Estes aquíferos têm porosidade secundária significativa a partir de fraturas que sofrem a dissolução do carbonato pela água, formando cavidades que podem atingir grandes extensões. A dinâmica do movimento é anisotrópica, devido aos fluxos terem direções preferenciais através de fraturas e articulações dos estratos. Os grandes sistemas criados devido à dissolução química nestas rochas formam os nomeados aquíferos *Karst*, cujas cavidades assemelham-se às cavernas (ALFY, *et al.*, 2019).

Portanto, as propriedades do aquífero que afetam a disponibilidade de água subterrânea incluem a espessura, o tamanho do aquífero e o número e grau de interconexão dos espaços porosos. Os poros no leito rochoso apresentam-se como fraturas, estas, podem formar extensos dutos, resultantes da dissolução e / ou aberturas dos elementos que compõem a rocha. Em depósitos não consolidados, todos os poros são intergranulares e, em depósitos de granulação fina, como argilas e silte, pode ocorrer porosidade secundária, geralmente na forma de fraturas (BERRE; DOSTER; KEILEGAVLEN, 2018). Devido à impossibilidade do mapeamento geométrico detalhado, utilizando-se apenas dados superficiais, as redes de fraturas e os estratos dos solos são mais bem delineados com base em observações e medições em afloramentos, furos, aberturas da subsuperfície e/ou dados geofísicos.

## 2.6. Prospecção de águas subterrâneas

A pesquisa de água em subsuperfície requer o emprego de meios apropriados à verificação de condições favoráveis à percolação de volumes precipitados e à presença de estruturas capazes de transmitir e armazenar os recursos hídricos subterrâneos. Em um estudo hidrogeológico são utilizadas informações preexistentes, regionais e locais. A investigação pode contemplar o uso de métodos indiretos ou geofísicos para se determinar o nível do lençol freático, a profundidade e a morfologia do embasamento<sup>3</sup>, as variações espaciais dos níveis de transmissividade da formação geológica, a existência de discontinuidades, a extensão lateral e as variações de espessura do pacote de solos (CAVALCANTI *et al.*, 1999).

### 2.6.1 Métodos geofísicos aplicados na prospecção de água subterrânea

A Geofísica é uma ciência que representa o conhecimento acerca dos componentes físicos da Terra, pelo estudo de sua estrutura, composição, propriedades físicas e processos dinâmicos. Os métodos e técnicas desenvolvidos para apoiar as pesquisas em geral têm aplicação indireta, portanto, considerados não invasivos. Os levantamentos de dados podem ser aéreos, com equipamentos embarcados em aeronaves tripuladas ou não (*e.g.* drones); marinhos, em embarcações para o estudo do fundo marinho; e terrestres.

A aplicação de técnicas e métodos geofísicos possibilita o conhecimento das características geológicas e hidrogeológicas da subsuperfície. O banco de dados elaborado a partir das informações em uma aquisição geofísica auxilia na posterior locação e na perfuração de poços para o abastecimento, bem como na gestão da água subterrânea. O êxito da pesquisa depende da compreensão das propriedades físicas do solo estudado, da experiência do profissional e do conhecimento prévio do ambiente geológico (VALENTA, 2015).

O uso de métodos geofísicos na identificação de zonas de acúmulo de água nos poros dos solos e das rochas é realizado por intermédio da análise das variações dos níveis de

---

<sup>3</sup> **Embasamento** - Crosta terrestre abaixo dos depósitos sedimentares, estendendo-se até a discontinuidade de Mohorovicic (descontinuidade entre a crosta e o manto terrestre), formada por rochas de origem ígnea ou metamórfica e com idades que variam entre as eras pré-cambriana, paleozoica, mesozoica ou cenozoica (NEUENDORF; MEHL; JACKSON, 2011).

condutividade elétrica e de densidade, possibilitando a utilização de equipamentos na detecção de reservatórios de água em subsuperfície (LEE; KIM, 2018). Os métodos geofísicos aplicados na prospecção de água subterrânea são: Elétrico, Magnético, Eletromagnético e Sísmico. Neste trabalho foram aplicados os três primeiros, cujas técnicas utilizadas estão descritas em a seguir.

#### 2.6.1.1. Método Elétrico

O método elétrico de prospecção de águas subterrâneas detecta na superfície os parâmetros elétricos do fluxo de corrente no subsolo. Na pesquisa utilizam-se técnicas para medir os campos naturais da Terra, por meio da técnica do potencial elétrico espontâneo e outras empregam a injeção de corrente elétrica artificial no terreno, por intermédio de uma fonte externa. Os dados obtidos são retratados aos níveis de condutividade e/ou resistividade dos componentes em subsuperfície.

A resistividade expressa o grau de oposição à passagem de corrente elétrica através de um material. A condutividade reflete a facilidade que o material permite o fluxo de corrente em sua estrutura. As relações entre a intensidade de corrente elétrica que percorre o subsolo, a diferença de potencial entre a fonte e o receptor e a disposição geométrica dos eletrodos na área investigada fornecem subsídios para o cálculo da resistividade aparente<sup>4</sup> em subsuperfície. O procedimento de aquisição de dados consiste em medir o potencial elétrico de determinadas regiões ao longo de um perfil. As técnicas de campo do método elétrico diferem entre si em relação à disposição dos eletrodos na superfície do terreno e na maneira do desenvolvimento dos levantamentos para a obtenção de dados em uma campanha, de acordo com os objetivos de cada trabalho. Na escolha da melhor matriz para uma pesquisa de campo são considerados: o tipo de estrutura a ser mapeada, a sensibilidade para identificar as alterações vertical e horizontal e, a razão sinal/ruído. Os dados são mapeados e as

---

<sup>4</sup> Resistividade aparente - o termo refere-se ao valor obtido entre dois pontos em superfície após a corrente elétrica atravessar o subsolo (meio heterogêneo). O valor corresponderá à contribuição das resistividades de todos os componentes do trecho percorrido, em função da separação entre os eletrodos (fator geométrico).

interpretações das anomalias são baseadas em sua geometria (LOKE, 2000; DENTITH, M.; MUDGE, 2014). As técnicas de campo do método elétrico são apresentadas a seguir.

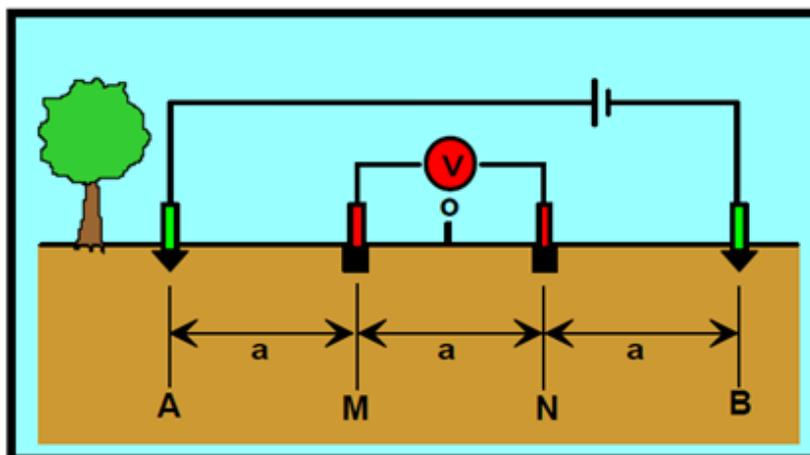
#### 2.6.1.1.1 Tomografia elétrica ou Caminhamento elétrico (perfil 2D)

Trata-se do emprego do método elétrico para a investigação lateral ou de perfil horizontal e vertical das variações de resistividade em subsuperfície. Na obtenção dos dados são utilizadas diferentes matrizes de eletrodos, como arranjos no terreno, os quais são aplicados de acordo com os objetivos do trabalho, para facilitar as medições em campo e a interpretação dos dados. Nos itens a, b e c são descritas as matrizes mais usuais dessa técnica.

##### a) Arranjo Wenner

No arranjo Wenner (Figura 2.12) aumenta-se a distância dos eletrodos de maneira proporcional, mantendo a localização do ponto central da matriz. A separação (a) é crescente e constante durante todo o desenvolvimento do ensaio. O deslocamento dos eletrodos é simultâneo, porém, mantém-se constante a relação:  $AM = MN = NB = a$ , com o centro do arranjo (o) permanecendo fixo (BRAGA 2002). A matriz possui boa resolução para o mapeamento de alterações verticais (estruturas horizontais) e menor efetividade na detecção alterações horizontais (estruturas verticais estreitas) (LOKE, 2000).

Figura 2.12 – Arranjo Wenner.



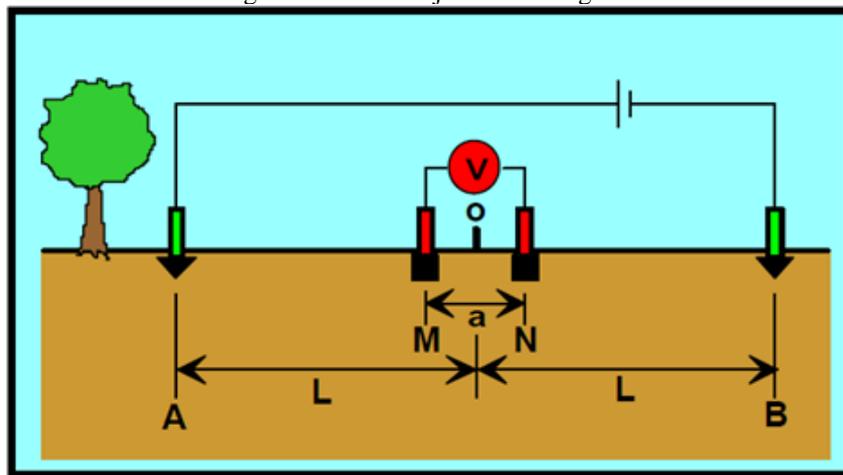
Fonte: BRAGA (2002).

##### b) Arranjo Schlumberger

Os eletrodos são dispostos em linha e localizam-se em torno de um ponto médio comum. Em cada medição, os eletrodos de corrente (A e B) são movidos para uma posição

mais externa, ao longo da pesquisa, enquanto os eletrodos M e N permanecem na mesma posição. Isto significa que os eletrodos de corrente A e B são distanciados de maneira crescente ( $L$ ), em relação ao centro do arranjo ( $o$ ) e os eletrodos de potencial M e N permanecem fixos durante a aquisição de dados (Figura 2.13) (BRAGA 2002). De acordo com Elis (2008), a matriz Schlumberger é amplamente utilizada em sondagem elétrica vertical, devido as suas características geométricas serem favoráveis à identificação de alterações verticais (estruturas horizontais), pela facilidade e celeridade na execução da pesquisa e, por ser menos susceptível às variações laterais de resistividade e ruídos.

Figura 2.13 – Arranjo Schlumberger.



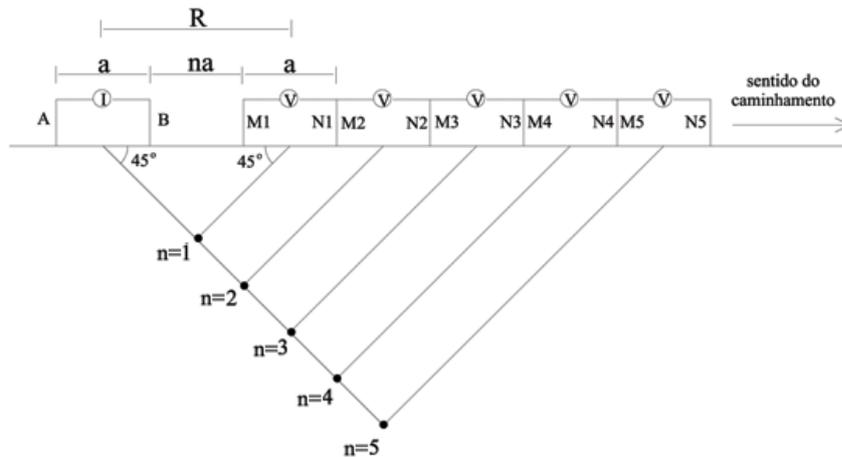
Fonte: BRAGA (2002).

### c) Arranjo Dipolo-dipolo

Em cada medição, os dados de resistividade aparente, correspondem ao ponto médio entre os dois dipolos, a uma profundidade condizente à metade da distância entre eles. Mantêm-se uma distância igual para os eletrodos de corrente (AB) e de potencial (MN) (espaçamento =  $a$ ), com a distância entre os eletrodos AB e MN, em função de  $(n \cdot a)$ , correspondendo aos níveis de investigação em profundidade (Figura 2.14) (BRAGA 2002; LOKE, 2000). Utiliza-se esta matriz com frequência para o mapeamento de estruturas verticais (*e.g.* diques e cavidades). BRAGA, em 2006, ressalta a versatilidade no desenvolvimento desse arranjo no campo para as investigações hidrogeológicas aplicadas em estudos sobre a captação e a contaminação de água subterrânea. O autor enfatiza que se pode utilizar de maneira simultânea vários dipolos de recepção (MN) no estudo das variações elétricas horizontais, sendo possível atingir vários níveis em profundidade na investigação. Em vista disso, o uso dessa matriz confere mais rapidez no levantamento de dados. Quando se considera a metodologia ideal nesses estudos, na análise da geologia local em função da

resolução do método/técnica de investigação, o caminhamento elétrico (ou Tomografia 2D) é apontado como o mais adequado para as pesquisas com o propósito de captação de águas subterrâneas em aquíferos fraturados em rochas cristalinas e aquíferos cársticos em rochas sedimentares.

Figura 2.14 – Arranjo Dipolo-dipolo



Fonte: GANDOLFO; GALLAS (2007).

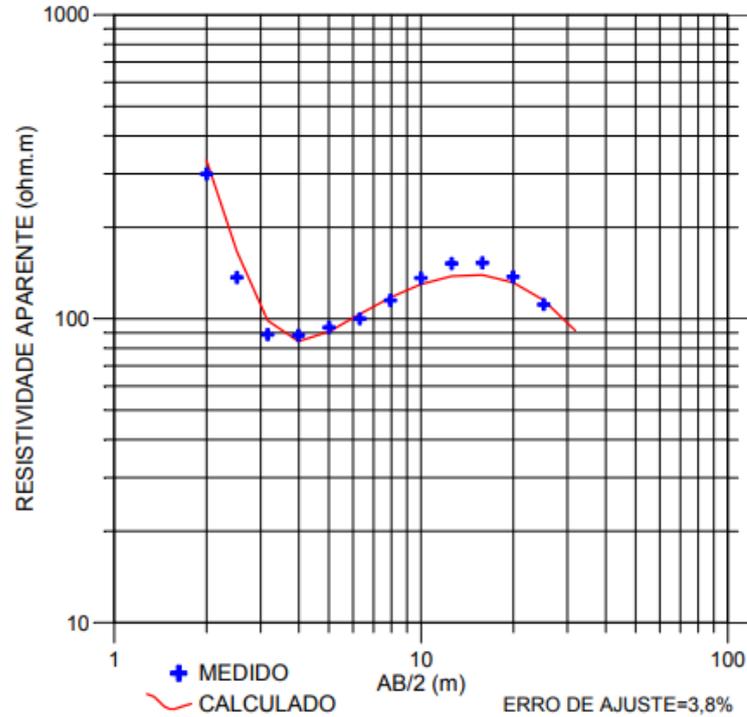
Na identificação de estruturas horizontais (*e.g.* soleiras ou camadas sedimentares) o arranjo não oferece resolução satisfatória (BARKER, 1989). No entanto, em pesquisas 2-D possui uma melhor cobertura do perfil horizontal quando comparado aos arranjos *Wenner* e *Schlumberger* (ALWAN, 2013).

#### 2.6.1.1.2 Sondagem Elétrica Vertical - SEV (perfil 1D)

A SEV consiste em uma pesquisa pontual em que se deseja medir a variação vertical da resistividade. Nesta técnica, a medida de resistividade é executada apenas para se estabelecer as variações em níveis de profundidade. Na aquisição dos dados, os eletrodos de corrente e potencial são configurados espacialmente em torno de um ponto central que é mantido fixo. Inicia-se a configuração com uma pequena distância entre os eletrodos, que ao longo do ensaio são afastados de maneira simétrica e progressiva, em intervalos predefinidos. Na medida em que a distância entre os eletrodos aumenta, cresce a profundidade de investigação no ponto central, podendo chegar a centenas de metros. Os arranjos de eletrodos mais empregados em uma aquisição por SEV são: *Wenner* e *Schlumberger* (Figuras 2.12 e 2.13) (TELFORD; GELDART; SHERIFF, 1990). Os valores de resistividade obtidos pela aplicação da técnica representam as matrizes de um diagrama bi-logarítmico (Figura 2.15),

onde são construídas as curvas de resistividade aparente. A partir dessas curvas é possível calcular os valores de resistividade e determinar a espessura das camadas que formam o subsolo.

Figura 2.15 – Exemplo de diagrama de Sondagem Elétrica Vertical - SEV.



Fonte: GANDOLFO (2007).

### 2.6.1.1.3 Potencial espontâneo

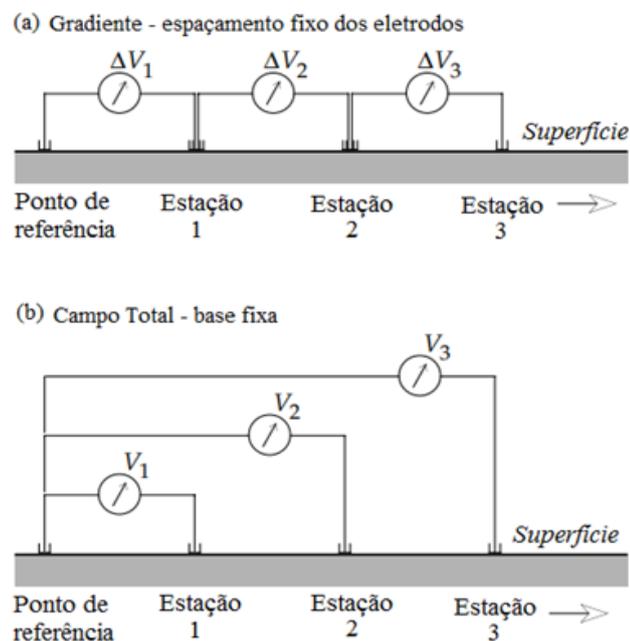
Baseia-se na medição em superfície dos potenciais naturais ou espontâneos resultantes de reações eletroquímicas e das dinâmicas eletrocinética e termoeétrica na subsuperfície (LOWRIE, 1997; ARSÈNE, *et al.*, 2018). Por exemplo, quando a água (eletrólito) flui através de um orifício ou canal estreito, uma diferença de potencial - ddp (tensão) pode surgir entre as suas extremidades. A amplitude da ddp dependerá da resistividade elétrica, da viscosidade do eletrólito e do gradiente de pressão. Anomalias positivas são normalmente verificadas nas áreas de vazão de água subterrânea, enquanto as anomalias negativas correspondem às áreas de infiltração (LOWRIE, 1997).

No levantamento de dados em uma pesquisa de potencial espontâneo, utiliza-se um voltímetro digital com alta sensibilidade e impedância de entrada. O dispositivo mede a diferença de potencial natural entre dois eletrodos implantados no solo. Para evitar o acúmulo

de cargas espúrias nos eletrodos, que podem mascarar ou atenuar os sinais de potencial espontâneo são utilizados eletrodos não polarizáveis<sup>5</sup> (REVIL; JARDANI, 2013).

Os arranjos mais comuns da disposição dos eletrodos nessa técnica são Gradiente e Campo Total. O primeiro utiliza um espaçamento fixo entre os eletrodos (Figura 2.16A), onde, após cada aquisição, todo o conjunto é deslocado a intervalos regulares e iguais. No arranjo do Campo Total utiliza-se um eletrodo como uma base fixa, enquanto o outro é deslocado ao longo do perfil (Figura 2.16B).

Figura 2.16 – Arranjos de eletrodos.



Legenda: (a) Disposição dos eletrodos, de acordo com a geometria de gradiente de tensão; (b) Distribuição espacial dos eletrodos para a leitura direta do campo total.

Fonte: LOWRIE (1997).

As principais vantagens da técnica de Potencial Espontâneo são a determinação da direção do fluxo na investigação de águas subterrâneas, o fácil manuseio do equipamento e o prático processamento dos dados (LOWRIE, 1997; GALLAS, 2005). A prospecção de água subterrânea, a detecção de contaminantes e a caracterização do subsolo podem ser efetuadas pelo uso isolado ou por associação e integração entre diferentes métodos e/ou técnicas

<sup>5</sup> Eletrodo não polarizável - haste de metal submersa em uma solução saturada de seu próprio sal. O conjunto fica contido em um corpo cerâmico (material inerte), permitindo que o eletrólito escoe lentamente por suas paredes porosas, fazendo contato elétrico com o solo (REVIL; JARDANI, 2013).

geofísicas. Estes procedimentos conjuntos visam extrair o máximo de proveito da capacidade de cada método, selecionados de acordo com as características ambientais e da subsuperfície, para ampliar as informações acerca do alvo investigado e dirimir incertezas.

AZIMAN *et al.* (2018) localizaram uma área potencial para a captação de água subterrânea, onde posteriormente foi perfurado um poço, após realizarem um trabalho de prospecção, por intermédio da Tomografia elétrica 2D, no campus da universidade Tun Hussein Onn, Malásia. ARSÈNE *et al.* (2018) imbuídos pela escassez aguda de água potável em locais da região de Adamawa, na República dos Camarões, utilizaram as técnicas Potencial espontâneo e Tomografia elétrica 2D, do método elétrico, para indicar os locais mais favoráveis para a locação de poços.

Na região de El-Basateen, em uma área de cemitério no Cairo, Egito, MORSY, *et al.* (2018) aplicaram as técnicas do método elétrico: Sondagem Elétrica Vertical – SEV e Tomografia elétrica (2D) e, a técnica Radar de Penetração no Solo – GPR, do método eletromagnético (item 2.6.1.3), para estimarem a profundidade das camadas geológicas em subsuperfície, o seu grau de saturação e os caminhos preferenciais da água ao infiltrarem no subsolo.

As pesquisas de SOLDAL *et al.* (1994) em Sunndalsøra e Esebotn, no oeste da Noruega foram efetuadas para avaliar a possibilidade de extração de água subterrânea salina, com a finalidade do recurso ser usado na piscicultura. Em dois aquíferos dessas regiões utilizaram técnicas de diferentes métodos geofísicos:

- os perfis gerados a partir da Tomografia elétrica 2D (método elétrico) serviram para revelar a variabilidade espacial e sazonal da intrusão de água do mar;
- os perfis obtidos por intermédio do GPR (método eletromagnético) foram capazes de mostrar a variação espacial dos limites da zona de transição, entre a solução salina e de água doce. A Sísmica de Reflexão (item 2.6.1.4) foi usada no mapeamento de estruturas da base dos aquíferos.

Em uma região da Coreia do Sul, a contaminação das águas subterrâneas por lixiviado de um aterro não controlado foi comprovada pelos trabalhos de monitoramento de PARK *et al.* (2016), com a aplicação das técnicas de Tomografia elétrica 2D e 3D. Os resultados apontavam que as anomalias de baixa resistividade associavam-se às zonas contaminadas.

#### 2.6.1.2. Método Magnético

O campo magnético da Terra resulta do movimento (rotação, convecção ou combinação entre os dois processos) dos metais que compõem a parte líquida do núcleo em torno da sua parcela sólida, igualmente composta por elementos metálicos (KISS, 2016; GUNNARSDÓTTIR, 2012). O campo magnético terrestre sofre influência das rochas da crosta (campo crustal) compostas por elementos ferromagnéticos e, de fontes externas, como os ventos solares e as correntes elétricas na ionosfera (GUNNARSDÓTTIR, 2012).

Os registros paleomagnéticos<sup>6</sup>, em rochas, indicam que a orientação do campo magnético sempre esteve, aproximadamente, paralela ao eixo de rotação da Terra. Essas informações gravadas ao longo dos séculos mostram que a posição dos polos se desloca, invertendo em dados momentos, assim como a intensidade do campo, que sofre variações. Estas alternâncias do campo do planeta (internas) ocorrem em períodos muito longos (milhares de anos) (VALENTA, 2015).

Na utilização do método geofísico magnético, inúmeros aspectos relacionados à complexidade das variações do campo terrestre devem ser considerados. Em modificações causadas por fontes externas, a amplitude é menor do que as decorrentes das mudanças internas. Contudo, devido ao seu período ser muito mais curto, pode afetar o levantamento de dados (BLOXHAM *et al.*, 1989). Essas alterações são nominadas como variações:

- Diurnas (ou diurnais), que ocorrem em um período de 24 horas e têm amplitude de várias dezenas de nano teslas - nT (Tesla - unidade de medida das variações do campo magnético);
- Lunares, acontecendo em um período de 25 horas e com amplitude de 2 nT e;
- De Curta duração, com variações de décimo de nT até dezenas de nT, em períodos de décimos de segundo a dezenas de minutos, podendo ser periódicas ou aleatórias e expressam, principalmente, os efeitos da atividade solar.

As variações ocasionadas pelas tempestades magnéticas são a fonte externa mais importante, com amplitudes aleatórias e de vários milhares de nT (VALENTA, 2015).

Em uma investigação utilizando o método magnético, além do conhecimento sobre as fontes capazes de promover alternâncias no campo magnético da Terra, torna-se necessário

---

<sup>6</sup> Registro do magnetismo remanescente, em rochas, contendo indicações das características do magnetismo terrestre antigo, referente à idade em que ele foi fixado (CPRM, 2020).

compreender o processo de magnetização das rochas. Esta dinâmica acontece por indução, quando o corpo rochoso é exposto a um campo magnético variável ou remanência. Esta última pode ser primária, durante a sua formação, ou secundária, em decorrência de processos físicos e químicos. As propriedades magnéticas das rochas podem sofrer alterações ou serem perdidas, quando aquecidas; restabelecerem-se, ao resfriarem e/ou desaparecerem, devido a alterações químicas e outros processos.

Os minerais magnéticos ocorrem na natureza de diversas formas: em rochas ígneas extrusivas (formadas pelo rápido resfriamento do magma que atingiu a superfície por meio de erupções vulcânicas) e intrusivas (formadas, em profundidade, pelo lento arrefecimento do magma); em rochas que sofreram transformações mineralógicas, texturais e estruturais, sob a ação de temperatura e/ou pressão (metamorfismo); em rochas sedimentares, onde os minerais magnéticos ocorrem de forma detrítica e/ou precipitados quimicamente (LYATSKY, 2010).

Em atenção às dificuldades impostas por essa múltipla complexidade, alguns cuidados e protocolos são estabelecidos durante a aquisição, o processamento e a interpretação dos dados. No cumprimento destas determinações são efetuadas correções nos dados magnetométricos obtidos, como a remoção de alterações diurnas e do campo magnético regional (*International Geomagnetic Reference Field - IGRF*). Os valores espúrios das alternâncias do campo magnético (exceto os oriundos das tempestades magnéticas) podem ser retirados dos dados adquiridos de maneira simples. Para tal, utiliza-se uma estação base e subtraem-se esses valores de referência dos dados medidos em campo (correção da variação diurna). A correção do campo magnético regional (remoção do IGRF) consiste na subtração do valor IGRF do valor adquirido, no mesmo ponto. Este procedimento se torna necessário porque o IGRF é um modelo teórico-matemático do campo magnético da Terra, calculado a cada cinco anos pelo *International Association of Geomagnetism and Aeronomy - IAGA*, em função das coordenadas geográficas (latitude e longitude), da altitude e do dia, mês e ano. Depois de corrigidos, os valores são designados DGRF (*Definitive Geomagnetic Reference Field* ou Campo de Referência Geomagnético Definitivo). Por essa razão é imprescindível que os dados coletados estejam acompanhados de informações precisas sobre o local (coordenadas) das medidas realizadas, o dia, mês e ano. Em virtude das tempestades magnéticas possuírem amplitudes muito altas e aleatórias, as medições realizadas durante a ocorrência desses eventos tornam-se inviáveis devido à dificuldade na correção dos dados (THÉBAULT *et al.*, 2015).

Os dados magnetométricos obtidos em campo, após a remoção de alterações diurnas e a correção do campo magnético regional são filtrados a fim de elaborar produtos que contribuam na caracterização do subsolo e no delineamento de falhas e contatos geológicos.

#### 2.6.1.2.1. Mapas magnetométricos

Os mapas do Campo Magnético Total, da Primeira Derivada Vertical do Campo Magnético Total, da Amplitude do Sinal Analítico e da Deconvolução de Euler são produzidos em ambiente georreferenciado, por *softwares* de processamento e interpolação dos dados.

O mapa do Campo Magnético Total reflete o contorno das anomalias magnéticas de acordo com uma grande variação de amplitude, ocasionada pela superposição dos sinais gerados por fontes situadas a várias profundidades, com diferentes geometrias e contrastes de susceptibilidade. Quando se deseja realçar os componentes de fontes mais rasas utiliza-se o Mapa da Primeira Derivada Vertical, para uma melhor visualização dos contrastes magnéticos. O mapa da Amplitude do Sinal Analítico é usado para se determinar parâmetros geométricos da fonte (limites, geológicos e estruturais e as dimensões da fonte), permitindo delimitar com mais precisão a procedência da anomalia magnética. A partir do conhecimento da geometria da fonte pode-se traçar o mapa da Deconvolução de Euler, para o estabelecimento da estimativa de profundidades e da morfologia do embasamento.

O uso da magnetometria permite mensurar a intensidade do campo magnético terrestre e deve ser proporcional aos contrastes de susceptibilidade magnética<sup>7</sup> dos componentes das rochas em subsuperfície e o seu grau de integridade, aumentando ou diminuindo a energia do campo. Na aquisição de dados em uma campanha geofísica, as medidas fora do padrão do campo magnético (denominadas de anomalias magnéticas) são associadas às variações na susceptibilidade magnética das rochas ou nas assembleias de minerais que as compõem.

---

<sup>7</sup> Susceptibilidade magnética - refere-se à capacidade de um material em magnetizar-se sob a ação de um campo magnético, ao qual este é submetido. A susceptibilidade magnética é expressa por uma constante adimensional.

A intensidade do campo magnético local pode variar em função da presença de objetos ferromagnéticos enterrados, falhas ou fraturas de rochas (descontinuidades), do contato entre litologias distintas, da profundidade do topo das rochas etc. (YUSUF, 2016), tornando favorável o uso da magnetometria para as investigações dos aspectos ambientais com propriedades ferromagnéticas, a sua localização, a geometria, a profundidade e também os caminhos preferenciais da água no subsolo.

MUTHAMILSELVAN *et al.* (2017) utilizaram a magnetometria para localizar áreas potenciais para a captação de água subterrânea, identificando zonas de falhas/fraturas e a presença de diques, perto do vilarejo Mecheri, distrito de Salem, estado de Tamil Nadu, Índia.

HELALY (2017) realizou a identificação mais detalhada das características hidrogeológicas de subsuperfície aplicando além do método Magnético, duas técnicas do método elétrico (SEV e Potencial espontâneo), em Wadi Allaqi, Deserto Oriental, Egito. Os perfis magnéticos obtidos por intermédio das medidas efetuadas serviram para determinar a espessura da sucessão sedimentar, a profundidade do embasamento e mapear as estruturas geológicas. Os perfis de SEV e Potencial espontâneo indicaram dois locais com depósitos saturados de água subterrânea, corroborando com os resultados da magnetometria que apontaram a favorabilidade de existência de água nesses locais.

#### 2.6.1.3. Método Eletromagnético

O método eletromagnético opera com a propagação de campos eletromagnéticos com frequências variadas e baseia-se nos fenômenos físicos de eletricidade e magnetismo. Um campo eletromagnético pode ser originado pela passagem de uma corrente alternada através de um pequeno núcleo composto por muitas voltas de fio (bobina), sendo denominado de campo primário. Quando a corrente desse campo se propaga no solo, os seus componentes reagem a esse estímulo inicial gerando correntes induzidas, que por sua vez, produzem campos magnéticos secundários, induzindo correntes na bobina de recepção. Estas diferenças entre os campos eletromagnéticos, transmitido e recebido, revelam os contrastes ou a homogeneidade dos elementos envolvidos nesta interação e fornecem informações sobre as suas propriedades elétricas.

As ondas eletromagnéticas podem se propagar em superfície e em subsuperfície. A profundidade de penetração do sinal depende da sua frequência e da condutividade elétrica do meio em que ele se propaga. As ondas eletromagnéticas são atenuadas ao atravessarem o solo em razão das propriedades e características físicas de seus elementos e, têm as suas

amplitudes reduzidas exponencialmente, de acordo com o nível de profundidade. Isto significa que a profundidade de investigação é dependente da frequência (frequências mais altas estão relacionadas com menor profundidade e frequências mais baixas com maior profundidade). As técnicas do método eletromagnético podem ser classificadas em domínio da frequência e domínio do tempo ou transitório. No domínio do tempo as medidas são executadas em função do tempo e no domínio da frequência, a corrente transmitida muda com o tempo, a uma frequência variável. Em ambos os casos os equipamentos empregados operam por meio de uma fonte controlada (fonte artificial).

Em técnicas baseadas no domínio da frequência ou *Frequency Domain Eletromagnetic* (FDEM) são medidas as variações de resistividade ou condutividade após a indução de corrente em subsuperfície. Os resultados obtidos dependem exclusivamente da condutividade absoluta do alvo e não do contraste das propriedades elétricas do ambiente. Além desses fatores, se distinguem: a eficácia na detecção de camadas condutoras e também a capacidade de identificação de elementos condutores mais profundos mesmo sob a presença de uma camada altamente resistiva. Entretanto, sob uma camada condutora espessa (*e.g.* argila; camada saturada de água salina) podem não ser detectadas as zonas fraturadas mais profundas e a água doce (moderadamente condutiva) presente em zonas saturadas (CHANDRA, 2016).

As técnicas baseadas no domínio do tempo ou *Time Domain Eletromagnetic* (TDEM) surgiram da necessidade de se investigar alvos em profundidade, em locais de baixa resistividade, uma vez que as técnicas FDEM não eram capazes de realizar essas pesquisas com boa resolução. Isto significa que, ao contrário da FDEM, em áreas condutoras sobrejacentes a uma camada moderadamente condutora, a aplicação da TDEM pode ser eficaz na sua identificação. As técnicas eletromagnéticas fundamentadas no domínio do tempo – TDEM (eletromagnéticas transitórias) têm sido amplamente utilizadas na prospecção de águas subterrâneas e na detecção de camadas litológicas com características hidrogeológicas (*e.g.* formações não consolidadas e consolidadas, leitos de areia e argila, presença de água subterrânea doce e salina e plumas de contaminação condutivas etc.). Em relação ao método elétrico, a TDEM é menos afetada pela variação topográfica, bem como pelas mudanças laterais na resistividade (ruído geológico). Assim como nas técnicas FDEM, o resultado da sua aplicação depende exclusivamente da condutividade absoluta do alvo e não do contraste das propriedades elétricas do ambiente, como acontece no método elétrico (CHANDRA, 2016).

As diferentes técnicas do método eletromagnético também são classificadas de acordo com o parâmetro medido pelo equipamento. Algumas aferem a inclinação do campo

resultante, outras são usadas para medir as componentes do campo e existem técnicas empregadas para mensurar diretamente a condutividade ou resistividade elétrica. Essas técnicas podem ser do modo passivo, utilizando os sinais naturais da Terra (*e.g.* Magnetotelúrico; *Very Low Frequency* (VLF) ou ativo, em que um transmissor artificial é usado no campo (*e.g.* GPR; Slingram). As técnicas do modo passivo são as que utilizam os sinais naturais do solo e as técnicas do modo ativo são aquelas que utilizam uma fonte artificial.

O equipamento utilizado para a aquisição de dados pela técnica do modo ativo induz no solo níveis de intensidade elétrica e força magnética, realizando a leitura, em superfície, da resposta à propagação dos campos eletromagnéticos após o sinal percorrer o subsolo. A indução de correntes resulta da variação do campo magnético e, portanto, não há a necessidade de contato físico com o solo, tanto pelo dispositivo emissor, quanto pelo receptor.

#### 2.6.1.3.1. Técnicas frequentemente utilizadas na prospecção de água subterrânea.

##### 2.6.1.3.1.1 Radar de Penetração no Solo ou *Ground Penetrating Radar* (GPR)

No emprego da técnica do Radar de Penetração no Solo ou Georadar são utilizados equipamentos que emitem ondas eletromagnéticas de alta frequência, como ondas de rádio, na faixa de 10 MHz – 2.6 GHz (AKINSUNMADE *et al.*, 2019), para o estudo de estruturas em subsuperfície. A seleção da antena mais adequada depende das características de cada pesquisa.

Durante a aquisição de dados, um pulso de energia de alta frequência é irradiado para o subsolo por intermédio de uma antena transmissora. A velocidade e o fator de refletividade da onda eletromagnética em subsuperfície são governados por níveis de condutividade elétrica, constante dielétrica (permissividade) e permeabilidade magnética do meio (MARTINEZ; BRYNES, 2001). Quando a energia passa por objetos enterrados ou atravessa os limites entre materiais com diferentes permissividades ou constantes dielétricas (Tabela 2.6), ela pode ser refletida, refratada ou difratada e, retorna à superfície. Este sinal que volta à superfície é captado por uma antena receptora e armazenado em *hardware*, podendo ser processado em uma etapa posterior (DANIELS, 2000). Deste modo, utiliza-se a técnica GPR para a detecção dos contrastes entre as propriedades elétricas dos diferentes elementos do subsolo. Isto permite a identificação de zonas com volumes de água, bem como o

mapeamento e a distribuição espacial de estruturas que possam contribuir para o fluxo e o armazenamento de água em subsuperfície.

Tabela 2.6 – Atenuação do sinal eletromagnético / permeabilidade relativa.

Material	Atenuação (dB/m)	Permeabilidade relativa $\epsilon_r$
Ar	0	1
Asfalto: seco	2 – 15	2 – 4
Asfalto: úmido	2 – 20	6 – 12
Argila	10 – 100	2 – 40
Cascalho: seco	1 – 10	3.5 – 9
Cascalho: úmido	2 – 20	8 – 25
Concreto: seco	2 – 12	4 – 10
Concreto: úmido	10 – 25	10 – 20
Água doce	0.1	80
Água doce congelada	0.1 – 2	4
Granito: seco	0.5 – 3	5
Granito: úmido	2 – 5	7
Calcário: seco	0.5 – 10	7
Calcário: úmido	10 – 25	8
Geleira	0.1 – 5	4 – 8
Halita (Sal-gema): seca	0.01 – 1	4 – 7
Areia: seca	0.01 – 1	4 – 6
Areia: saturada	0.03 – 0.3	10 – 30
Arenito: seco	2 – 10	2 – 3
Arenito: úmido	10 – 20	5 – 10
Água do mar	1000	81
Água do mar congelada	10 – 30	4 – 8
Xisto: saturado	10 – 100	6 – 9
Solo: resistente	0.1 – 2	8 – 12
Solo: arenoso seco	0.1 – 2	4 – 6
Solo: arenoso úmido	1 – 5	15 – 30
Solo: Silte argiloso seco	0.5 – 3	4 – 6
Solo: Silte argiloso úmido	1 – 6	10 – 20
Solo: Argiloso seco	0.3 – 3	4 – 6
Solo: Argiloso úmido	5 – 30	10 – 15

Legenda: Níveis de atenuação do sinal eletromagnético relativos às permissividades (constantes dielétricas) dos diferentes materiais (antena 100 MHz).  
Fonte: DANIELS (1996).

Na aplicação da técnica do GPR, as medidas realizadas em superfície correspondem ao tempo duplo de percurso do sinal refletido, refratado ou difratado em elementos ou discontinuidades presentes no subsolo. O produto da coleta de dados é uma seção de alta definição denominada radargrama. A partir do radargrama obtêm-se os tempos de viagem das ondas que retornam à superfície e, desta maneira, as profundidades dos elementos refletivos podem ser determinadas. Para que isso ocorra é necessário o conhecimento acerca das velocidades de propagação da onda no meio percorrido (GANDOLFO, 2001).

Os módulos de emissão e recepção do equipamento GPR podem operar com antenas de diversas frequências, cuja escolha será em função do alvo a ser investigado. As antenas com frequências mais altas são capazes de produzir seções com alta resolução, contudo a penetração do sinal é baixa. As antenas com frequências mais baixas possuem maior penetração do sinal eletromagnético, porém geram seções de menor resolução (SUDAKOVA; VLADOV, 2018). Os sinais são transmitidos na forma de pulsos, cujo tempo total de viagem bidirecional (janela temporal) corresponde ao intervalo do percurso entre a antena transmissora (Tx) e a receptora (TR).

A aquisição de informações do subsolo na prospecção de água subterrânea por intermédio do GPR pode gerar perfis de reflexão ou sondagem de velocidade, em função da configuração da aquisição. O Quadro 2.2 reúne essas informações.

Quadro 2.2 – Atenuação do sinal eletromagnético / permeabilidade relativa.

<b>Configuração da aquisição GPR</b>	<b>Descrição</b>	<b>Aplicação</b>
Deslocamento Comum <i>Common-offset</i>	Receptor e o transmissor são mantidos a uma distância fixa e movidos ao longo de uma linha	Estudar as mudanças laterais ao longo de uma subsuperfície de interesse.
Ponto Médio Comum <i>Common Mid Point</i>	Antenas transmissora e receptora são deslocadas simetricamente em direções opostas, a partir de um ponto central	Investigação do subsolo ao longo do eixo vertical central
Reflexão e Refração de Grande ângulo <i>Wide Angle Refraction Reflections</i>	A antena transmissora é mantida fixa e somente a receptora é deslocada progressivamente ao longo do perfil	Uso limitado devido à alta atenuação do sinal ao percorrer o subsolo

Fonte: ANNAN; COSWAY, 1992; EVERETT, 2013; MELO, 2007.

#### 2.6.1.3.1.2. Very Low Frequency (VLF)

A técnica *Very Low Frequency* – VLF utiliza os transmissores estabelecidos em uma rede mundial (Figura 2.17) para a emissão de sinais na faixa de frequência de 3 a 30 kHz do espectro eletromagnético, cujos comprimentos de ondas figuram entre 10 e 100 km (BARR; JONES; RODGER, 2000). Estas características possibilitam que o sinal seja capaz de se propagar a longas distâncias, inclusive em águas com elevado teor salino, em que possuem alto poder de penetração. Por isso, originalmente as transmissões eram usadas para fins militares, na comunicação da base com os submarinos.

Na aplicação da técnica VLF a banda de frequência usada nas pesquisas fica entre 15 – 25 kHz. Uma estação fixa transmite o sinal de uma torre alta emitindo continuamente ondas eletromagnéticas em uma determinada frequência. Um ou vários transmissores em diferentes frequências nesta referida banda podem ser utilizados por vez na aplicação da técnica. A seleção das estações transmissoras irá depender da direção do *strike* (ângulo entre a linha N-S e a linha da interseção do plano geológico com o plano horizontal) das estruturas geológicas na área pesquisada. Este sinal emitido pelas estações é captado por um aparelho (receptor VLF) provido com 2 antenas ortogonais que podem ser sintonizadas para a frequência particular de um dado transmissor (OSKOOI; PEDERSEN, 2005).

Figura 2.17 – Distribuição espacial da rede mundial de transmissores VLF.



Fonte: GEM, 2021.

Os estudos com VLF são indicados para mapear estruturas condutoras, em áreas onde a camada superficial é altamente resistiva e o levantamento é difícil devido à má condução da corrente eletrolítica. Pode ser usado para o mapeamento da resistividade dos elementos até cerca de 200 m de profundidade, em estudos ambientais e na prospecção rasa de águas subterrâneas em rochas duras. A aplicação da técnica proporciona a produção de perfis com boa resolução, capazes de demarcar a disposição lateral das macrofraturas, entretanto, a sua resposta é atenuada exponencialmente na presença de uma camada condutora e também de acordo com a progressão a níveis mais profundos. (SHARMA; BISWAS; BARANWAL, 2014; CHANDRA, 2016).

#### 2.6.1.3.1.3 Magnetotelúrico

A técnica do magnetotelúrico (MT) fundamenta-se em utilizar parte das flutuações temporais, naturais do campo eletromagnético, para determinar a distribuição da condutividade ou resistividade elétrica das camadas subjacentes à superfície terrestre.

A faixa de operação da técnica MT situa-se entre as frequências de  $10^{-4}$  a  $10^4$  Hz. Na sua aplicação são medidos simultaneamente os componentes ortogonais dos campos elétrico (E) e magnético (H). Em frequências abaixo de 1 Hz, a maior parcela do sinal eletromagnético (EM) provém da interação entre os ventos solares e a magnetosfera. Na baixa atmosfera, as tempestades elétricas são a principal fonte dos campos EM entre 1 Hz e 10 kHz. Nesta dinâmica, a maioria da energia incidente é refletida e uma pequena quantidade se propaga para o interior da Terra (VOZOFF, 1991). Esta energia comporta-se como um campo eletromagnético que se encontra variando no tempo e, ao atravessar os materiais condutores, estes, induzem campos eletromagnéticos secundários, originando a propagação de correntes elétricas naturais (telúricas).

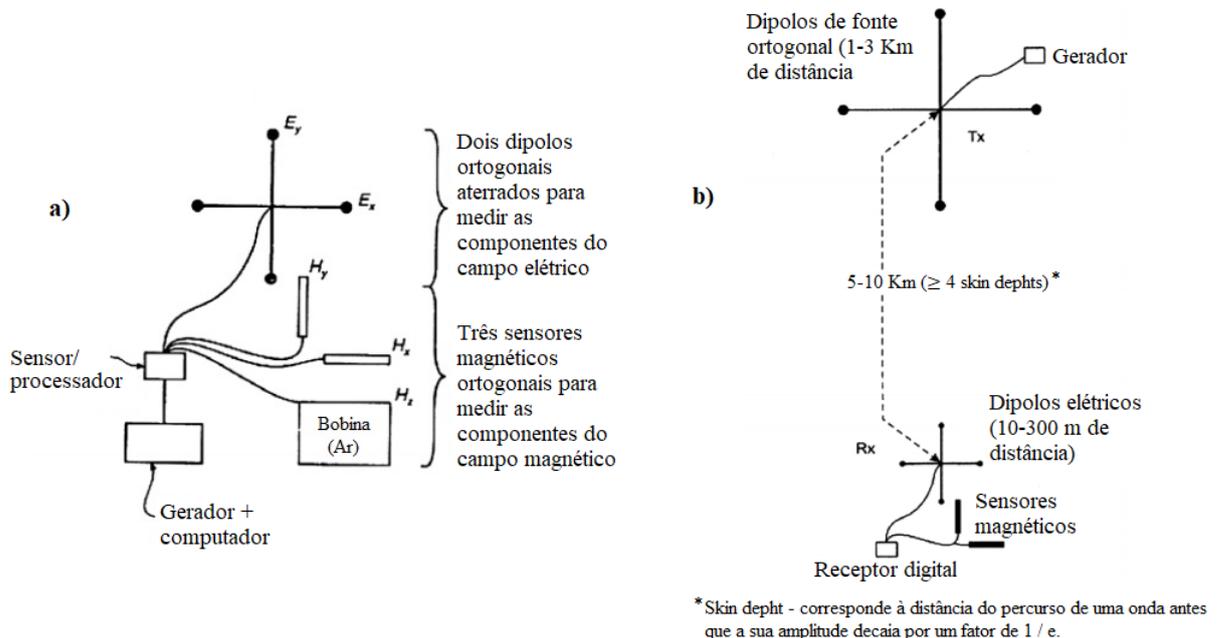
A investigação pela técnica MT pode alcançar profundidades de algumas dezenas de metros até centenas de quilômetros. A escolha da faixa de frequência de operação, de acordo com o equipamento, dependerá da profundidade do alvo, tendo em vista que o sinal transmitido em menores frequências penetra mais profundamente e a energia com elevadas frequências limita-se a profundidades mais rasas, entretanto, com melhor resolução. Em aplicações com a utilização de altas frequências ou frequências na faixa de áudio, a técnica recebe a nomenclatura de audiomagnetotelúrico (AMT) (VOZOFF, 1991), sendo usada para o mapeamento de estruturas em elevada resolução (em geral, para profundidades até 1000 m),

com ampla utilização na exploração de água subterrânea, estudos ambientais, geotecnia e mineração (REYNOLDS, 2011).

A principal limitação da técnica MT é a dificuldade de se obter dados em áreas de ruído eletromagnético acentuado. Dentre as vantagens estão a sua capacidade de exploração em grandes profundidades e, em profundidades rasas fornecer resultados com alta resolução, não necessitando utilizar fonte artificial, exceto em versões de uso da técnica com fonte controlada (REYNOLDS, 2011).

O *layout* de um levantamento magnetotelúrico utilizando fontes naturais e controladas é mostrado na Figura 2.18. De maneira geral, o arranjo é composto por dois dipolos elétricos ortogonais que medem os dois componentes elétricos horizontais e, dois sensores magnéticos paralelos aos dipolos elétricos, para mensurar os componentes magnéticos correspondentes. Um terceiro sensor mede o componente magnético vertical. Desta maneira, em cada local, cinco parâmetros são medidos simultaneamente em função da frequência do sinal, aferindo as alterações nos campos magnético (H) e elétrico (E).

Figura 2.18 – Diagrama esquemático de um levantamento Magnetotelúrico.



Legenda: a) Esquema de levantamento de dados padrão. b) Aquisição com o uso de fonte controlada.

Fonte: adaptado de REYNOLDS (2011).

Diversos estudos de caso atestam a utilidade do método eletromagnético em investigações de águas subterrâneas. Nas pesquisas de Mahmoudzadeh *et al.* (2012), em uma bacia semiárida de Sardon, Salamanca (Espanha) e Maheswari *et al.* (2013), em Hyderabad, capital do estado de Telangana, no sul da Índia, a técnica *Ground Penetrating Radar* (GPR)

foi usada para a caracterização das estruturas em subsuperfície e na delimitação do nível do lençol freático em um ambiente de rochas graníticas. O GPR foi empregado por Igel; Gunther; Kuntzer (2013), para delinear a geometria das lentes de água doce do leste da ilha de Borkum (noroeste da Alemanha) e mapear as estruturas subsuperficiais hidraulicamente relevantes.

Em um experimento controlado no aquífero da base militar de Borden (força aérea canadense), aproximadamente 90 km a noroeste de Toronto, Ontário, Canadá, Hwang *et al.* (2008) deram continuidade aos estudos de Brewster e Annan (1994), com a substância tetracloroetileno. Os pesquisadores testaram e comprovaram (em 2008) a capacidade da técnica GPR para a detecção e o monitoramento de plumas DNAPL<sup>8</sup> de menor volume, que são mais representativas de derramamentos industriais em pequena escala.

Nos trabalhos de Jamal e Singh (2018) em Sangod Block, Kota District, Rajasthan, Índia e Ait Bahammou, *et al.* (2019) na localidade de Zaouia Jdida, Bacia Errachidia, Marrocos, as técnicas *Very Low Frequency* (VLF) e de resistividade elétrica (Sondagem Elétrica Vertical - SEV e Tomografia elétrica 2D, respectivamente) foram eficazes na identificação de áreas potenciais de armazenamento de água subterrânea, para atender à demanda de água potável e de irrigação, da população local.

As técnicas Slingram e sondagem elétrica vertical (SEV) foram integradas por Mohammed Nazifi e Gülen (2019) para avaliar o potencial de água subterrânea para a exploração, em áreas de comunidades de Twifo - Hemang Lower Denkyira, no Gana, África. Os resultados indicaram vários locais para a perfuração de poços.

No Brasil, em uma praia estuarina localizada na Ilha de Mosqueiro, região metropolitana de Belém, estado do Pará, o GPR foi usado por Correia *et al.* (2019) na definição da área de penetração da cunha salina no período de estiagem e, no monitoramento do nível freático.

No município de Caxambú, Minas Gerais, Oliveira *et al.* (2019), integrando as técnicas de Audiomagnetotelúrico e da Tomografia de Resistividade Elétrica (2D) identificaram estruturas em subsuperfície associadas ao armazenamento e condução de águas subterrâneas, delineando o comportamento do sistema de alimentação do aquífero hidromineral no Parque das Águas daquele município.

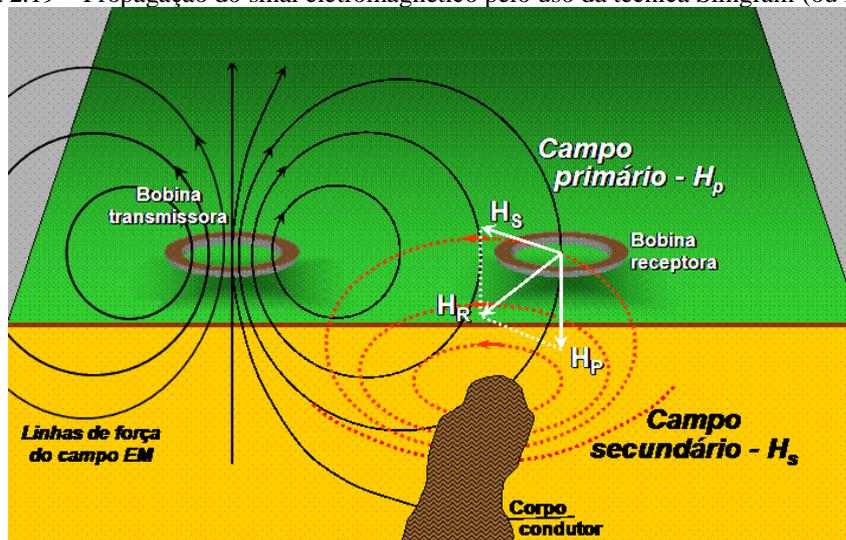
---

<sup>8</sup> DNAPL (*Dense Non-Aqueous Phase Liquid*) – os líquidos de fase não aquosa, são mais densos do que a água e, geralmente migram para as partes mais profundas de um aquífero.

#### 2.6.1.3.1.4. Slingram ou *Horizontal Loop electromagnetic (HLEM)*

A técnica Slingram consiste em mensurar as componentes do campo magnético por intermédio de duas bobinas movidas em conjunto e com espaçamento fixo entre elas. A bobina transmissora (Tx) produz um campo magnético primário, fazendo com que pequenas correntes circulem através dos elementos condutores presentes no subsolo. Em consequência a esse estímulo elétrico, estes materiais irão originar o seu próprio campo eletromagnético (campo secundário) na superfície (SCOTT, 2014) (Figura 2.19).

Figura 2.19 – Propagação do sinal eletromagnético pelo uso da técnica Slingram (ou HLEM).



Fonte: Adaptado de Braga (2016).

A técnica requer que uma amostra do sinal transmitido seja enviada ao longo de um fio para o receptor, onde é usado para sincronizar a fase do receptor com o transmissor. O campo resultante horizontal captado na superfície do terreno refere-se ao cômputo da leitura e comparação entre o campo primário e secundário, efetuado pelo equipamento receptor. (BRAGA, 2016). A partir dessas informações é possível inferir sobre a distribuição dos tipos de materiais no perfil, a profundidade da zona saturada e a respeito das zonas de contraste de condutividade e / ou suscetibilidade do subsolo.

Existem diferentes arranjos de bobinas para a utilização da técnica Slingram, dentre os quais o mais utilizado é o arranjo horizontal coplanar (por este motivo a técnica também recebe a nomenclatura *Horizontal Loop electromagnetic*), no qual as bobinas transmissora e receptora são dispostas em um plano horizontal.

#### 2.6.1.4.1 Método Sísmico

Este método, apesar de não ter sido utilizado neste trabalho, também é apresentado em função da sua aplicabilidade na prospecção de água subterrânea.

As ondas sísmicas possuem natureza mecânica e se propagam com frequências muito baixas (entre 0.001 Hz e 1 Hz). A porosidade, a presença de água e o teor de argila influenciam na velocidade em que as ondas sísmicas se propagam nas rochas (LUCIUS; LANGER; ELLEFSEN, 2006). As principais ondas sísmicas são as Primárias (P) e as Secundárias (S). As ondas primárias se propagam em sólidos e líquidos e possuem comportamento compressional na sua direção da propagação. As ondas secundárias possuem movimento perpendicular à direção de propagação e somente transitam por meio sólido.

O método sísmico utiliza equipamento (sismógrafo) capaz de armazenar as informações sobre o efeito da irradiação das ondas sísmicas, produzindo resultados (em seções 2D) que refletem o perfil das estruturas geológicas da subsuperfície. Isto é possível devido ao contraste entre as propriedades petrofísicas<sup>9</sup> das rochas. No subsolo, os limites de separação dos diferentes meios têm distintas velocidades e densidades. Por estes motivos, as ondas sísmicas são refratadas e refletidas, de acordo com os diversos níveis de impedância<sup>10</sup> acústica dos materiais.

Na aplicação do método verifica-se que o grau de atenuação das ondas primárias (ondas P) tem relação com os níveis de porosidade e fluido existente nos poros das rochas (TELFORD; GELDART; SHERIFF, 1990; DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL PROTECTION, 2011). Portanto, técnicas de refração e reflexão sísmica são utilizadas para mapear o nível estático da água em subsuperfície, definir

a profundidade do embasamento cristalino, bem como inferir sobre a porosidade e a densidade de fraturas de uma rocha, tornando o método apropriado à exploração de água subterrânea.

No método sísmico utiliza-se um emissor (marreta, explosivos e outros) para gerar energia, que é propagada sob a forma de ondas sísmicas. Após percorrer a subsuperfície, estas

---

<sup>9</sup> A **petrofísica** refere-se ao estudo das propriedades físicas das rochas e da distribuição de fluidos em seus espaços porosos (ARCHIE, 1950).

<sup>10</sup> **Impedância** - Medida de oposição (resistência) de um circuito ou um conjunto de elementos à passagem de energia através de sua estrutura.

ondas são detectadas por receptores, como geofones dispostos em intervalos regulares. Por conseguinte, o equipamento sísmico registra a chegada da energia da onda e o tempo que esta demora a percorrer a distância do ponto emissor ao receptor. Os dados obtidos são usados para traçar gráficos de tempo - distância (dromocrônicos), a partir dos quais se pode inferir qual a velocidade de propagação da onda, em cada horizonte e, a profundidade de suas interfaces.

Esse método utiliza as técnicas de Refração e Reflexão. A Refração baseia-se em medições do tempo de deslocamento das ondas sísmicas diretas que viajam pela superfície e das ondas refratadas em interfaces litológicas e camadas subsuperficiais com diferentes impedâncias acústicas (*e.g.* solo poroso x rocha; meio insaturado x interface saturada). A técnica normalmente é usada em locais onde a rocha está a menos de 150 m abaixo da superfície do solo (DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL PROTECTION, 2011).

As principais vantagens dessa técnica são a determinação da profundidade do lençol freático ou do leito rochoso, o detalhamento de estruturas geológicas e a detecção de níveis diferentes de porosidade, permeabilidade, compactação etc. Como limitações, têm-se a demora na coleta e na interpretação dos dados e as grandes distâncias entre a fonte e os receptores, exigindo grandes comprimentos de linha para que a profundidade de exploração seja alcançada (DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL PROTECTION, 2011).

A técnica da Reflexão utiliza o tempo que as ondas propagadas a partir da fonte sísmica levam até atingir uma descontinuidade nas propriedades médias da subsuperfície (interface). O registro do tempo decorrido até as ondas retornarem ao receptor é usado para estimar a profundidade da estrutura que gerou a reflexão. Deste modo é possível visualizar e delinear o perfil dos elementos refletores, os quais podem evidenciar estruturas geológicas (LUCIUS; LANGER; ELLEFSEN, 2006).

A principal aplicação da reflexão sísmica é o detalhamento das camadas geológicas. As limitações mais importantes da técnica são a imprecisão da profundidade das interfaces e a complexidade na aquisição e no processamento dos dados (DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL PROTECTION, 2011).

No trabalho utilizando a Sísmica de refração com o propósito de prospecção de água subterrânea, Adeoti *et al.* (2012) determinaram o nível do lençol freático em um condomínio da cidade de Golden Heritage, estado de Ogun, Nigéria. Brixová; Mosná e Putiška (2018) empregaram a sísmica de refração em conjunto com a tomografia de resistividade elétrica 2D na região dos Cárpatos ocidentais e apontaram a eficácia da técnica no mapeamento vertical de falhas e, destacaram que o uso combinado com o método elétrico foi capaz de fornecer a

caracterização da geologia e geomorfologia subsuperficial e, conseqüentemente, a determinação da profundidade do aquífero.

Na prospecção hidrogeológica na reserva Natural de Nylsvley, ao longo da planície de inundação do rio Nyl, na África do Sul, Onyebueke; Manzi e Durrheim (2018) fizeram o uso das técnicas Sísmicas de Reflexão e Refração e, da Tomografia de resistividade elétrica 2D para a identificação no subsolo, da zona fraturada e das interfaces dos meios porosos saturados, além de determinarem o nível do lençol freático.

#### 2.6.1.5. Considerações gerais sobre a aplicabilidade dos métodos geofísicos apresentados na prospecção de água subterrânea

Na prospecção de águas subterrâneas as medições realizadas pelo uso do método elétrico são frequentemente utilizadas para o mapeamento dos índices de resistividade e condutividade da zona intemperizada e dos inúmeros materiais e rochas em subsuperfície. A zona resistiva e fraturada e a presença de diques e falhas apresentam, inclusive, variações nos níveis de suscetibilidade magnética em comparação com a rocha íntegra. Em geral, as zonas de fratura/falha estão associadas a uma suscetibilidade magnética comparativamente mais baixa, em relação aos diques básicos (basaltos; gabros; dioritos), que apresentam maior susceptibilidade.

Em levantamentos realizados utilizando-se o método magnético buscam-se as informações sobre os níveis de susceptibilidade magnética dos materiais, a presença de falhas, zonas fraturadas, diques e também a determinação da topografia do embasamento.

O variado grau de intemperismo e a presença de discontinuidades, como fraturas, por exemplo, causam variações na velocidade da onda sísmica e, portanto, as técnicas de refração e reflexão rasas são empregadas para delinear essas zonas.

A combinação ou integração entre diferentes métodos fornece um suporte quantitativo na interpretação de anomalias. Por este motivo, sempre que possível utiliza-se mais de um método com o objetivo de corroborar os resultados e obter o esclarecimento a respeito de possíveis ambigüidades.

Neste trabalho foram utilizados equipamentos de eletrorresistividade modelo *Syscal Kid Switch*, fabricado pela empresa *Iris Instruments*; de magnetometria (modelo GSM-19, fabricante GEM) e; eletromagnético (GPR) modelo ProEx (fabricante Mala), com antenas de 50MHz e 100MHz. O Quadro 2.3 resume os equipamentos utilizados neste trabalho e suas respectivas funções.

Quadro 2.3 – Equipamentos geofísicos utilizados e respectivas funções.

<b>Método geofísico</b>	<b>Equipamento</b>	<b>Modelo</b>	<b>Função</b>
Elétrico	Eletrorresistímetro	<i>Syscal Kid Switch</i>	Prospecção de água subterrânea; detecção de contaminantes; mapeamento de estruturas verticais (diques e cavidades).
Magnético	Magnetômetro	GSM-19	Estimativa de profundidades e da morfologia do embasamento; contato entre litologias distintas; presença de objetos ferromagnéticos enterrados, falhas ou fraturas de rochas (descontinuidades).
Eletromagnético	GPR	ProEx	Prospecção de águas subterrâneas e na detecção de camadas litológicas com características hidrogeológicas; identificação de plumas de contaminação condutivas.

Fonte: a autora.

### 3.METODOLOGIA

Além da revisão bibliográfica, a metodologia do trabalho foi desenvolvida em duas etapas principais:

- i) Aquisição de campo com uso de instrumentação e medição de dados e imagens georreferenciadas e
- ii) Análise, processamento e integração das informações.

Na etapa da revisão bibliográfica foram reunidos os dados socioeconômicos e os aspectos locais de 3 (três) municípios pertencentes à área de estudo, como: Miracema, São José de Ubá e Itaperuna. As informações obtidas ajudaram a estabelecer o panorama geral da região, a partir de informações dos aspectos físicos capazes de influenciar a disponibilidade quantitativa dos recursos hídricos, em geral. Tendo em vista a vocação agrícola e pecuária da região, as quais são responsáveis por demandas hídricas substanciais para o seu manejo, as áreas rurais dos municípios consistiram no foco deste trabalho. O critério de escolha dos três municípios para a realização das pesquisas foi de os mesmos estarem incluídos na região duramente impactada pela crise hídrica, e pela facilidade de acesso às áreas definidas previamente como potenciais, por estradas vicinais e secundárias, o que permitiu a aquisição de dados na extensão de algumas delas.

Os dados sobre clima, morfologia, vegetação, solos, hidrografia, hidrogeologia, uso e ocupação do solo foram reunidos em uma base georreferenciada e conjugados com os mapas geológico e estrutural, direcionando as atividades de campo para verificação de áreas potenciais à presença de água subterrânea. Esta conduta permitiu o entendimento global acerca dos fatores contribuintes para a presença de água. A compreensão destes elementos visou a estabelecer a correlação com a distribuição dos poços cadastrados na região pois, em maioria, os reservatórios estão localizados no contato entre rochas com características distintas. As pesquisas incluíram medidas de susceptibilidade magnética para a obtenção de informações sobre a composição e as propriedades e condições atuais dos materiais em subsuperfície, e a aquisição de dados com métodos geofísicos.

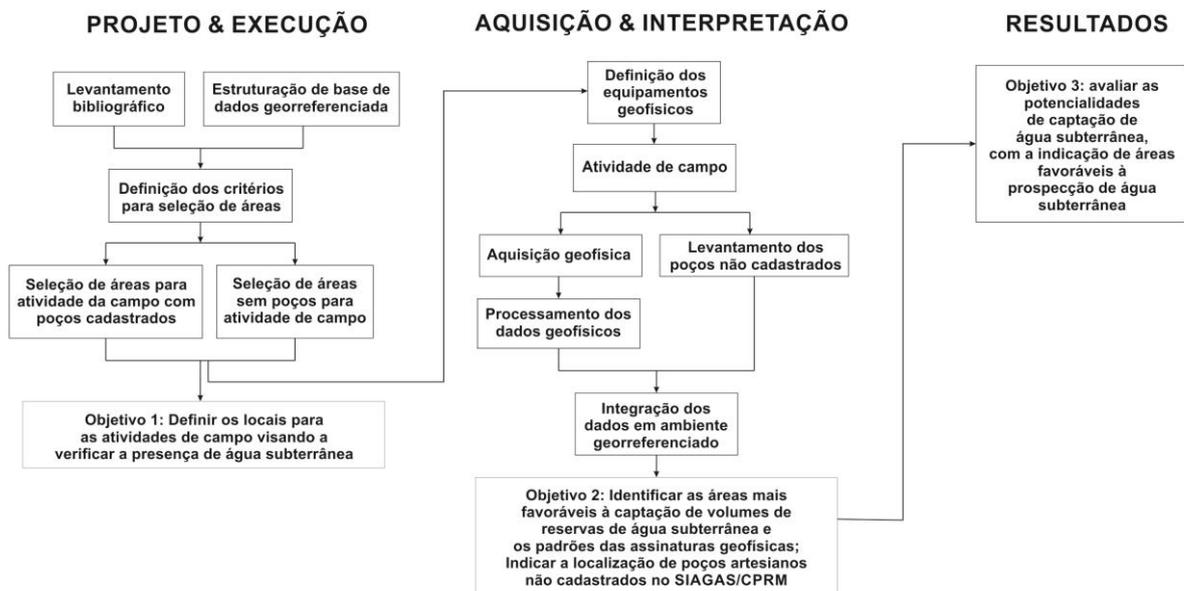
Os critérios utilizados na pesquisa foram: locais com poços cadastrados no SIAGAS, cujas aptidões serviram como padrão de referência; locais sem poços, com características similares às áreas utilizadas como referência; o contato entre as litologias; a presença de fraturas e a facilidade de acesso aos locais de medição.

Na etapa de atividades de campo, as análises das informações expeditas direcionaram a pesquisa aos locais com maior potencial para o armazenamento de água subterrânea.

No total foram realizadas três campanhas geofísicas, em diferentes períodos sazonais, visando a abranger intervalos com condições secas e úmidas do subsolo. As atividades de campo foram desenvolvidas nos meses de julho de 2019 e janeiro e outubro de 2020.

O fluxograma da Figura 3.1 ilustra as fases de planejamento e execução da pesquisa.

Figura 3.1 – Fluxograma metodológico realizado durante a pesquisa desta dissertação.



Fonte: a autora.

Durante a etapa de campo houve a constatação visual de poços não constantes no cadastro do SIAGAS. Nesses locais realizou-se o registro do posicionamento geográfico desses poços por GPS, na calçada em frente aos logradouros.

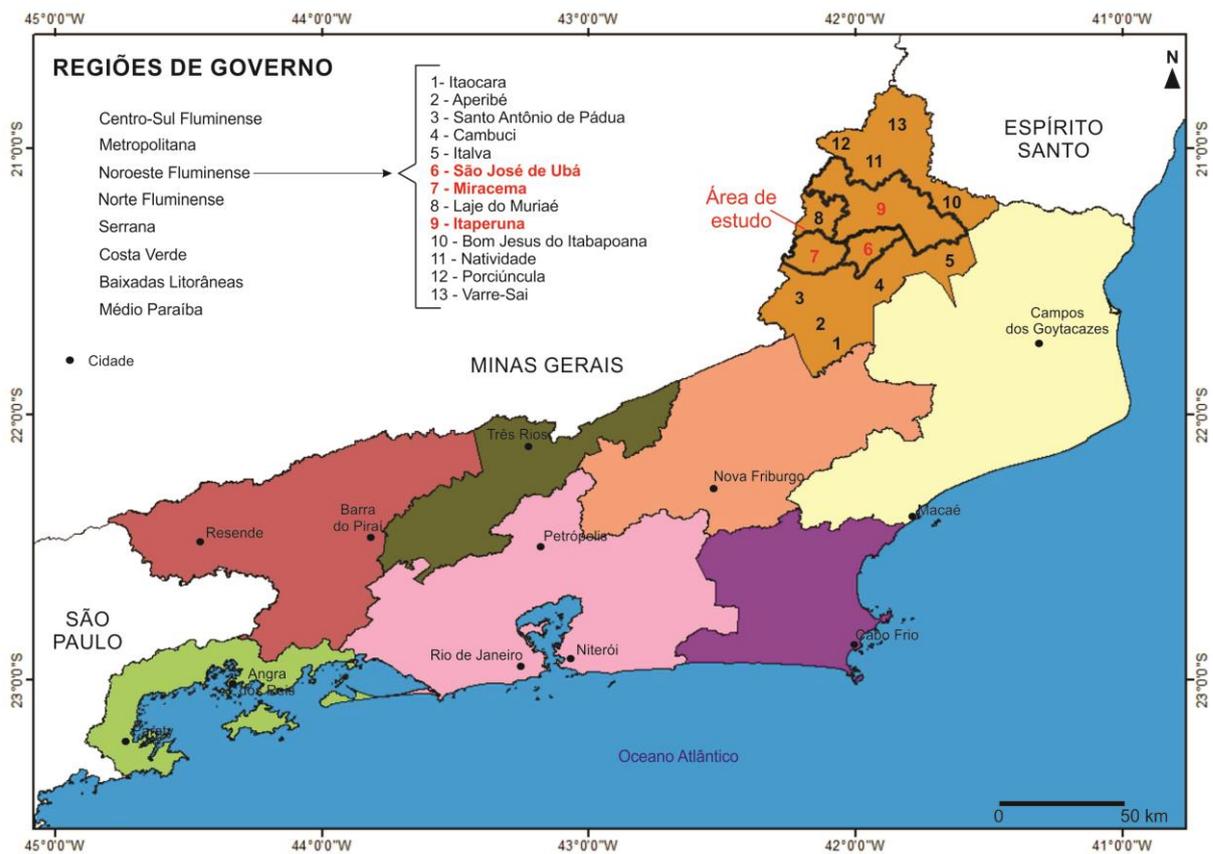
Na etapa posterior, após a campanha geofísica, os dados foram acessados e processados por intermédio dos *softwares* Prosys II e Res2DInv (Método Elétrico); GemLink e Geosoft (Método Magnético); GroundVision (aquisição de dados) e Reflex2DQuick (processamento) (Método Eletromagnético). Em sequência, essas informações foram analisadas em ambiente georreferenciado e integradas às informações no projeto previamente estruturado e georreferenciado, para a indicação das áreas potenciais para a captação de água no subsolo nos três municípios.

No item 3.4 são especificados os componentes basilares que fundamentam esta metodologia e os equipamentos e arranjos utilizados nos ensaios geofísicos.

### 3.1. Localização das áreas pesquisadas

A área de estudo compreende localidades dos municípios de Miracema, São José de Ubá e do município de Itaperuna, situados na região noroeste fluminense do estado do Rio de Janeiro (Figura 3.2) (IBGE, 2015; CEPERJ 2018). A região noroeste fluminense é composta por 13 municípios, reunindo, segundo o censo realizado pelo IBGE (2010), cerca de 2% da população estadual (SEBRAE, 2015; CEPERJ 2018).

Figura 3.2 – Municípios da região noroeste do estado do Rio de Janeiro, com destaque para os da área de estudo.



Fonte: a autora.

Itaperuna concentra 30% da população noroeste, destacando-se como o município mais povoado. A densidade demográfica mais elevada encontra-se em Aperibé (108 hab/km<sup>2</sup>), seguido por Miracema (88 hab/km<sup>2</sup>). A menor densidade é registrada em Cambuci (26 hab/km<sup>2</sup>) (SEBRAE, 2015). São José de Ubá contém a menor população da região com cerca de 7200 habitantes (IBGE, 2019). Os principais acessos para a área são a RJ-116, RJ-200, BR-393 e BR-356 (Figura 3.3) (IBGE, 2015). Os aspectos físicos dos municípios são detalhados nos itens a, b e c:

Figura 3.3 – Limites municipais de Miracema, São José de Ubá e sudoeste de Itaperuna e principais rodovias de acesso.



Fonte: a autora.

#### a) Miracema

O município de Miracema tem área de 303,27 km<sup>2</sup> (IBGE, 2020) e altitude média de 137 metros (sede) (IBGE, 2012). A distância até a capital do estado do Rio de Janeiro é de 271 Km (DER-RJ, 2018). Limita-se a norte com os municípios de Itaperuna e Laje do Muriaé-RJ; a sul, com Santo Antônio de Pádua (RJ); a leste, com São José de Ubá (RJ) e, a oeste, com Palma (MG). A cidade de Miracema é composta por três distritos (IBGE, 2017), Miracema (Sede, 1º Distrito), Paraíso do Tobias (2º Distrito) e Venda das Flores (3º Distrito). As rodovias estaduais que cruzam o município são RJ-200 e RJ-116. A rodovia RJ-200 liga o Distrito de Paraíso do Tobias ao Município de Palma (IBGE, 2015). A RJ-116 liga-se, a NE, à BR-356, e esta une-se à BR-116, no município de Muriaé (MG). Em direção sul, a RJ-116 liga Miracema aos municípios de Santo Antônio de Pádua, Aperibé e Itaocara, no estado do Rio de Janeiro.

#### b) Itaperuna

O município de Itaperuna possui área de 1.106,694 km<sup>2</sup> de extensão (IBGE, 2020), com altitude média de 112 metros (sede) (IBGE, 2012). A sede municipal situa-se a 313 Km da capital do estado do Rio de Janeiro (DER-RJ, 2018). A conexão com outras cidades é realizada por intermédio das rodovias RJ-210 e BR-356, que atravessam o município. Itaperuna limita-se a norte com Bom Jesus do Itabapoana e Natividade, a leste com o município de Italva (RJ), a sul, com Miracema (RJ), Laje do Muriaé (RJ), São José de Ubá (RJ) e, a oeste, com Eugenópolis (MG) e Patrocínio do Muriaé (MG).

c) São José de Ubá

O município de São José de Ubá possui área de 249,69 km<sup>2</sup> de extensão (IBGE, 2020). A sua sede localiza-se a 287 Km da capital do estado (DER-RJ, 2018) e o acesso aos outros municípios é efetuado por meio da rodovia BR-393 que atravessa o município e, em direção SW, conecta-se à RJ-116, no município vizinho de Santo Antônio de Pádua (RJ). São José de Ubá limita-se a norte com o município de Itaperuna, a sul, com Santo Antônio de Pádua e Cambuci, a leste, com Cambuci e, a oeste, com Miracema, todos no estado do Rio de Janeiro.

### 3.2. Dados socioeconômicos

Na Tabela 3.1 estão contidos os dados referentes aos índices demográficos dos municípios onde foram realizadas as pesquisas e, nos itens I, II e III, um breve panorama da situação socioeconômica nas áreas rurais destes.

Tabela 3.1. – Dados censitários dos municípios de Itaperuna, Miracema e São José de Ubá-RJ (IBGE, 2020).

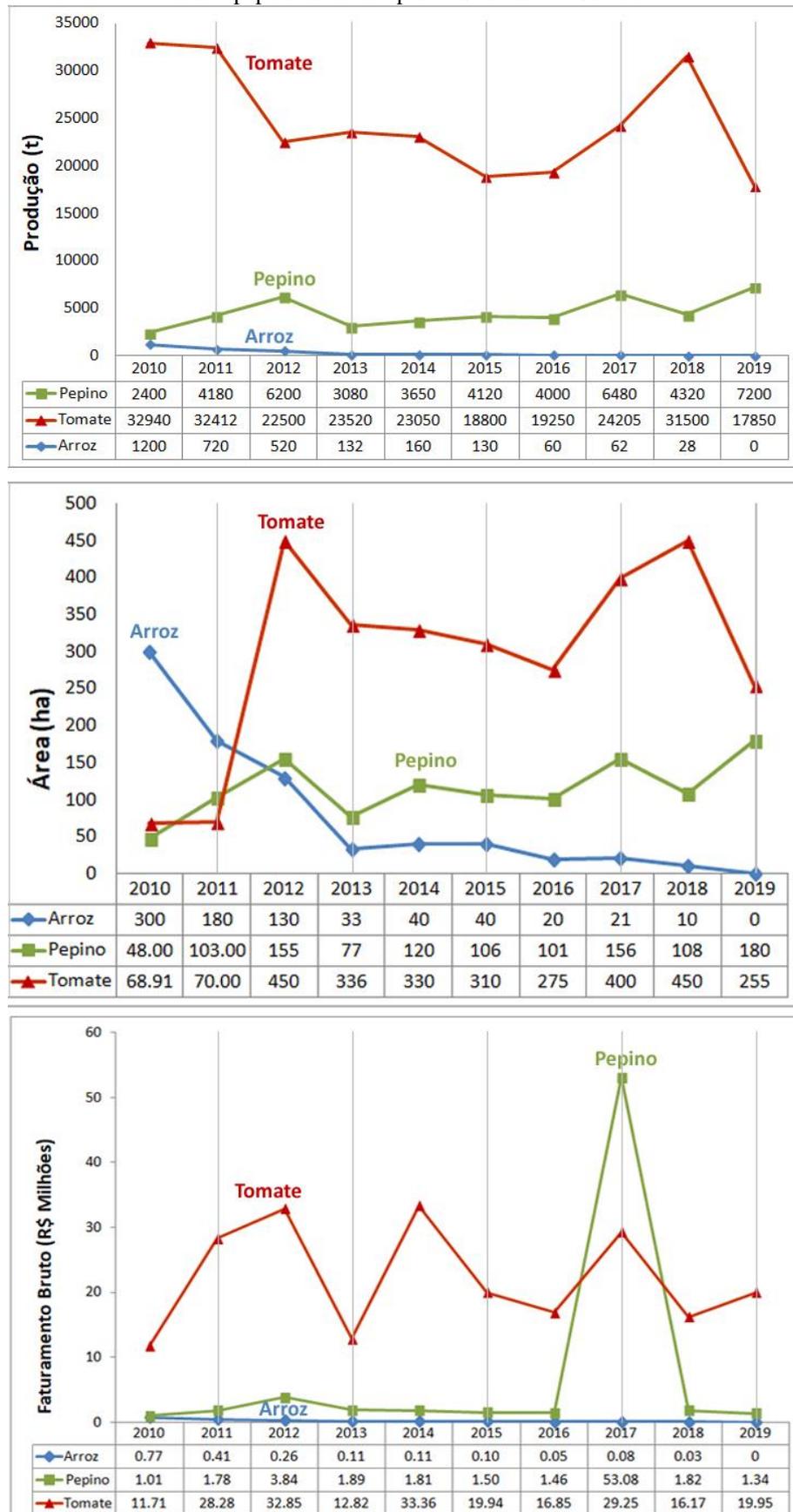
Município	Área (Km <sup>2</sup> )	População (Censo - 2010)	Densidade demográfica hab/Km <sup>2</sup>	População urbana	População rural	População (estimada 2020)
Itaperuna	1.106,69	95.841	86,71	29.432	2.447	103.800
Miracema	303,27	26.843	88,15	24.741	2.102	27.154
São José de Ubá	249,69	7.003	27,98	3.098	3.905	7.206

Fonte: a autora.

### I. São José de Ubá-RJ

São José de Ubá pertencia ao município de Cambuci até 1997. Cambuci esteve vinculado à expansão cafeeira e à obra da antiga ferrovia serrana Estrada de Ferro Santo Antônio de Pádua. Para o beneficiamento da produção do café das áreas vizinhas foi construído um engenho, cujas instalações formaram o núcleo inicial do município (INEPAC, 2019). O cultivo de produtos como o café, a cana-de-açúcar, o feijão, o algodão e o milho eram os mais comuns até 1960, quando foi iniciado o plantio de tomate. Este produto mudou a história econômica da cidade, que se tornou a segunda maior produtora de tomates do ERJ (IBGE, 2019). Esta segunda colocação persistiu até o ano de 2015. Em 2016, o município se tornou o maior produtor de tomates do estado (PESAGRO-RIO, 2016; EMATER-RIO, 2020). O cultivo do tomate corresponde ao maior faturamento do município (EMATER-RIO, 2020) (Figura 3.4), contudo, o tomateiro requer significativos volumes de água. No fruto maduro a água constitui de 93 a 95% do tomate (SANTANA *et al.*, 2011), podendo tornar a atividade onerosa e/ou ocasionar perdas significativas em períodos de estiagem. Em geral, a quantidade de água necessária para a irrigação do tomate varia de 3.000.000 a 6.500.000 litros/ha/ano (EMBRAPA, 2012).

Figura 3.4 – Evolução da lavoura e do faturamento atinentes às culturas de tomate, arroz e pepino no município de São José de Ubá-RJ.



Fonte: a autora.

O arroz também possui uma alta exigência hídrica, principalmente se o seu cultivo for feito pelo sistema tradicional de irrigação por inundação, com lâmina de água de cerca de 7 a 10 centímetros por até 120 dias (ARANTES, 2013). São necessários 5.000.000 litros/ha/ano para o seu plantio (BACK & JUST, 2018). Em São José de Ubá, a produção do arroz (orizicultura ou rizicultura) tem declinado ao longo dos anos e não ocorreu em 2019, cedendo espaço a outras culturas mais rentáveis, tal como a lavoura de pepinos, que demanda menores volumes de água e manejo. O plantio do pepino demanda 960.000 litros/ha/ano (BLANCO & FOLEGATTI, 2002).

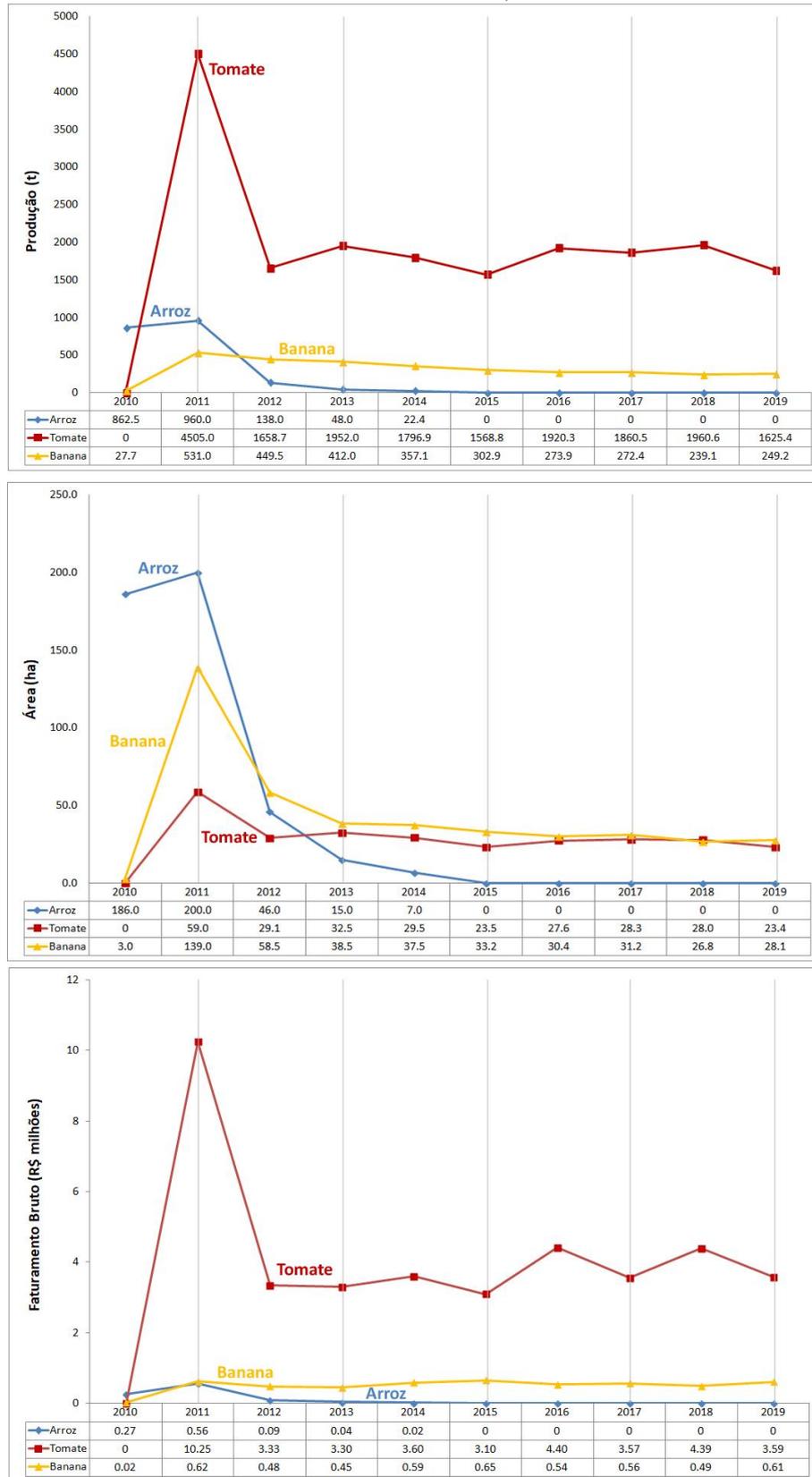
Outra atividade bastante empreendida em São José de Ubá é a pecuária leiteira, embora o rebanho não seja de boa qualidade devido às condições da vegetação dos pastos, necessárias para o seu desenvolvimento (IBGE, 2019).

## II. Miracema-RJ

Segundo o Instituto Estadual do Patrimônio Cultural, até o fim do século XIX a região de Miracema-RJ constituía importante zona produtora de café, arroz, milho e feijão. Em 1891 o governo atribuiu-lhe a condição de distrito. A indústria e o comércio se desenvolveram elevando a localidade à categoria de município, em 1935. Após a sua emancipação político-administrativa foi iniciado o plantio de algodão e cana-de-açúcar. A cultura do arroz irrigado, em conjunto com a pecuária leiteira era a sua principal atividade rural (INEPAC, 2019). Em 01/07/1960 foi realizada a sua divisão territorial e instituídos os limites das áreas referentes aos seus 3 distritos: Miracema, Venda das Flores e Paraíso do Tobias, sendo esta a atual configuração do território municipal (IBGE, 2019).

No decorrer dos anos, o tomate se tornou o mais importante produto agrícola, representando a maior parcela do faturamento da zona rural, seguido pelas culturas de cana de açúcar, banana e milho. A rizicultura sofreu decréscimo exponencial no plantio, de 2011 a 2012 e continuou a diminuir em função dos altos custos de produção e redução da oferta hídrica devido à estiagem no ERJ, de 2014-2017. Este cenário contribuiu para o desenvolvimento de outras culturas (e.g. banana) e aquela que fora a principal atividade do município, deixou de ser praticada em 2015 (Figura 3.5) (EMATER-RIO, 2020). A banana possui uma demanda hídrica de 432.000 litros/ha/ano (EMBRAPA, 2019).

Figura 3.5 – Evolução da lavoura e do faturamento da produção agrícola no município de Miracema-RJ, considerando as culturas de tomate, arroz e banana.



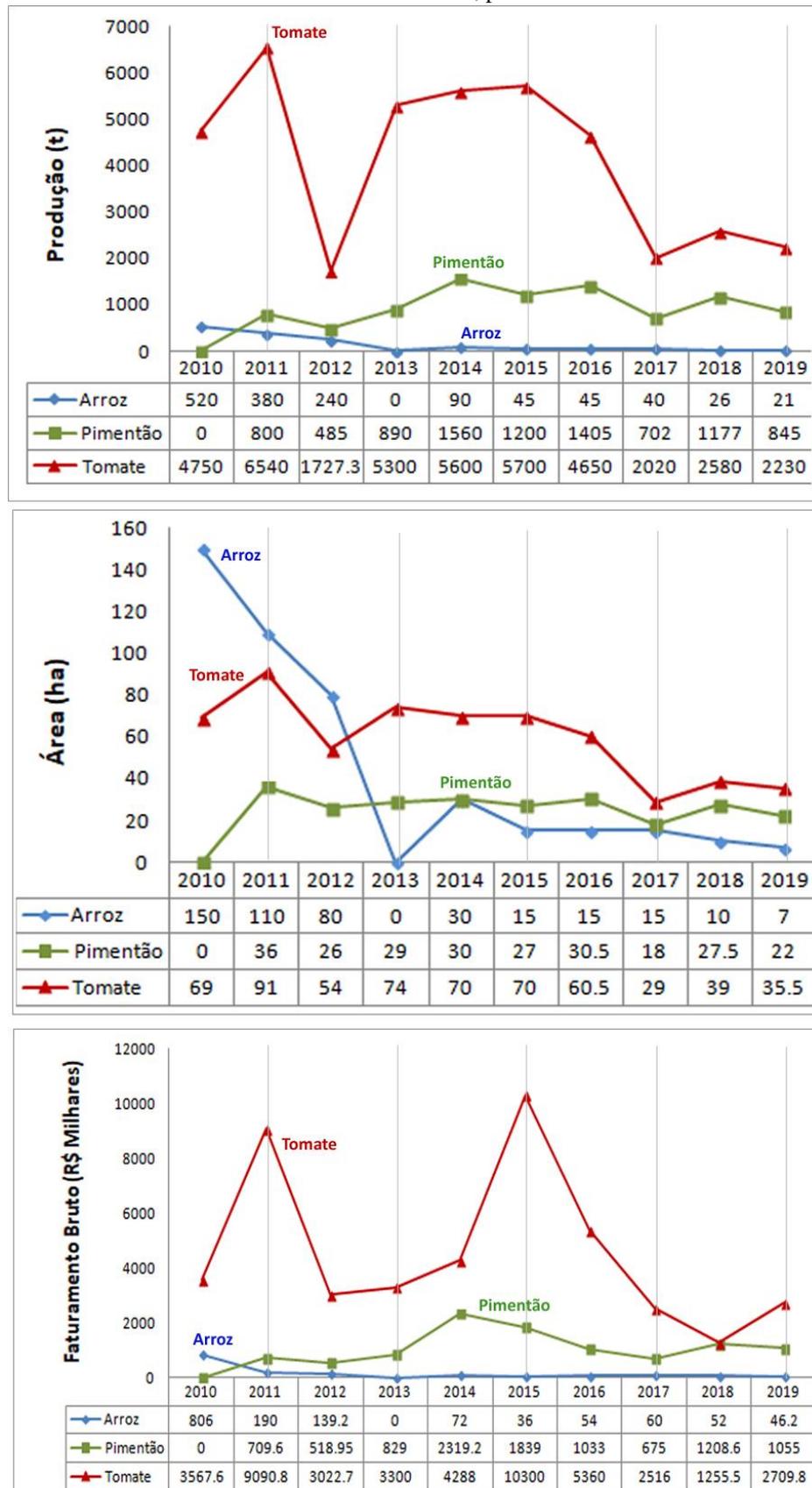
Fonte: a autora.

### III. Itaperuna-RJ

As terras onde está localizado o município de Itaperuna-RJ foram desbravadas no início do século XIX por José Lannes Dantas Brandão. Na ocasião, o café era a principal atividade econômica da região noroeste. Em 1885 a localidade foi elevada à categoria de vila com a denominação de Natividade de Itaperuna. Em 1889 recebeu a condição de cidade com a denominação de Itaperuna. A divisão territorial vigente é datada de 1944 e constitui-se de 7 distritos: Itaperuna, Boa Ventura, Comendador Venâncio, Itajara, Nossa Senhora da Penha, Raposo e Retiro do Muriaé.

Dentre as atividades agrícolas de Itaperuna destacam-se três produtos: as lavouras de tomate, apesar da menor produção a partir de 2016, representa a maior parcela do faturamento municipal; o cultivo do pimentão que desde 2011 tem sido feito com regularidade e demonstra resultados econômicos satisfatórios e, o arroz, cujas áreas de plantio decresceram exponencialmente ao longo dos anos, pois dos 150 hectares plantados em 2010, restaram apenas 7 hectares em 2019. (Figura 3.6) (EMATER-RIO, 2020). As lavouras do tomate representam um índice de faturamento elevado, contudo, há uma progressão descendente da cultura que pode estar relacionada aos custos de produção e a pouca disponibilidade hídrica na zona rural em períodos de estiagem. Na produção do arroz e do tomate, além dos custos dos insumos há elevada demanda por água e estes podem ser os motivos pelos quais as lavouras de pimentão se mantenham mais estáveis ao longo dos anos. O pimentão necessita de 4.500.000 a 6.500.000 litros/ha/ano na sua irrigação (EMBRAPA, 2012).

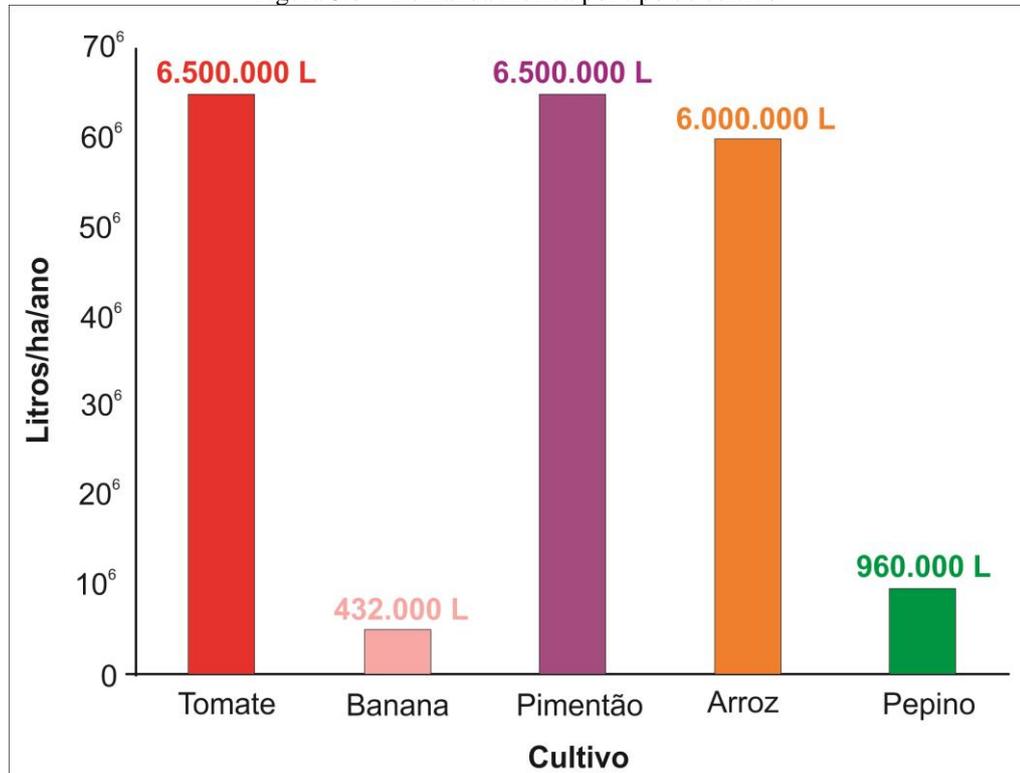
Figura 3.6 – Evolução da lavoura e do faturamento da produção agrícola no município de Itaperuna-RJ, considerando as culturas de arroz, pimentão e tomate.



Fonte: a autora.

A Figura 3.7 resume as demandas hídricas por hectare/ano das principais culturas das áreas de estudo, todavia, estes números podem variar em função da duração do ciclo de cultivo, material genético das plantas, condições climáticas da região ou sistema de cultivo.

Figura 3.7 – Demanda hídrica por tipo de cultivo.



Legenda: Os valores representam as médias máximas, em hectare por ano.

Fonte: Back & Just (2018); Blanco & Folegatti (2002); Embrapa (2019);  
Embrapa (2012).

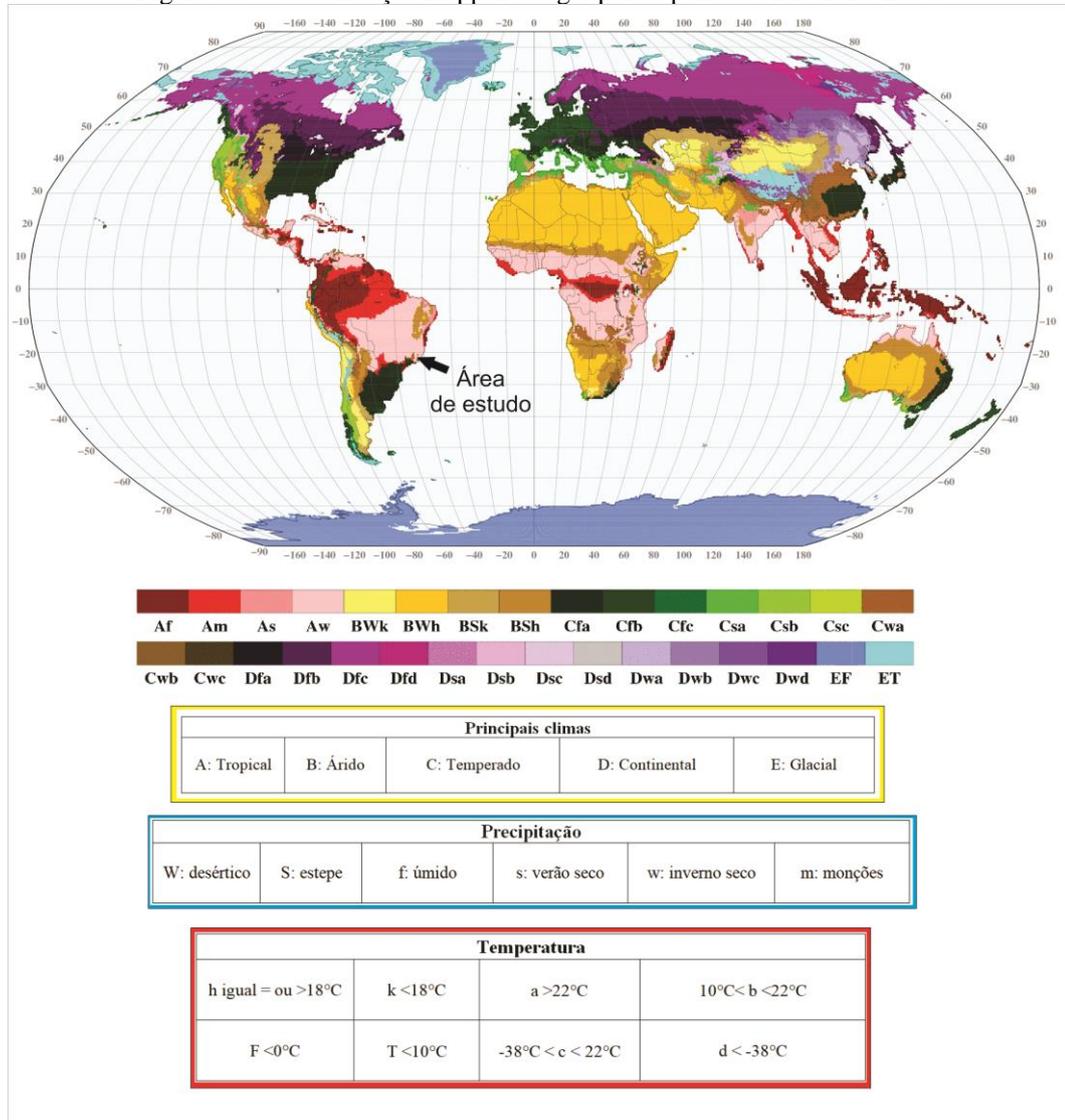
### 3.3 Aspectos locais

#### 3.3.1. Clima

O clima nas áreas pesquisadas, consonante com as estatísticas projetadas em 2010 na classificação *Köppen-Geiger* (Figura 3.8), para o período compreendido entre 2026-2050 é Aw. O sistema de classificação climática global de *Köppen-Geiger* foi proposto em 1900, pelo climatologista alemão Wladimir Köppen. O seu aperfeiçoamento contou com a colaboração de Rudolf Geiger, por isso, o nome *Köppen-Geiger*. A classificação foi elaborada sob a perspectiva de que a vegetação natural de cada grande região da Terra reflete o clima nela predominante. Partindo deste pressuposto, estabeleceram-se as fronteiras entre as regiões

climáticas de maneira condizente às áreas de predominância de cada tipo de vegetação (RUBEL; KOTTEK, 2010).

Figura 3.8 – Classificação Koppen-Geiger para o período entre 2026-2050.



Fonte: RUBEL; KOTTEK (2010).

A classificação Aw é atribuída ao clima tropical com o inverno seco. A estação das chuvas figura nos meses de novembro a abril e a estação seca entre maio e outubro, sendo julho o mês mais seco (EMBRAPA, 2019).

No Brasil há grande diversidade climática devido a sua grande extensão territorial e às diferenças de relevo, altitude e dinâmica das massas de ar e correntes marítimas. Em razão disso foram estabelecidos critérios de classificação para as regiões do país. NIMER (1972) propôs 4 tipologias climáticas (Tabela 3.2) considerando as áreas quanto aos padrões de umidade e seca mensais: superúmido (sem seca ou com subseca); úmido (1 a 3 meses secos);

semiúmido (4 a 5 meses secos); semiárido brando (6 meses secos); mediano (7 a 8 meses secos); forte (9 a 10 meses secos); muito forte (11 meses secos) e desértico (12 meses secos). A determinação da tipologia fundamentou-se na relação entre o número de meses secos e o tipo de vegetação natural predominante, com o intuito de mostrar a interação existente em termos de regime climático, ecologia e biogeografia (NIMER, 1989).

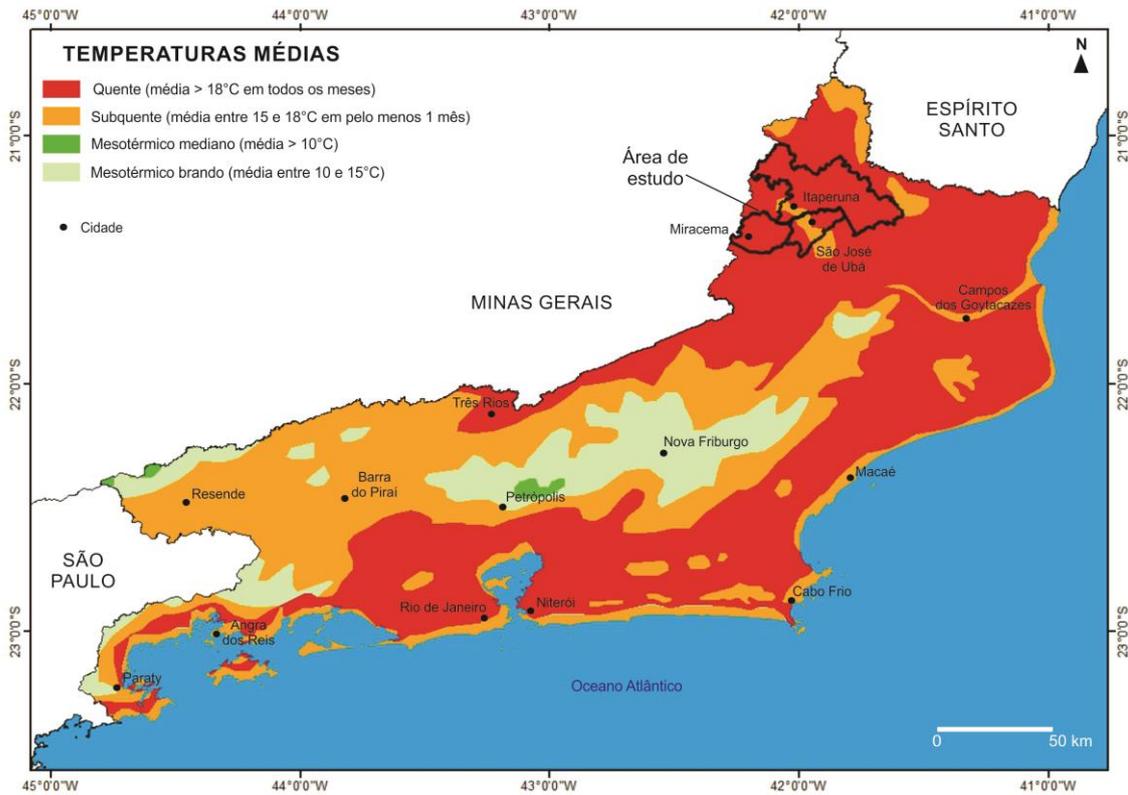
Tabela 3.2 – Tipologia climática conforme escala térmica.

Tipologia	Temperatura média do mês mais frio
Clima quente	Superior a 18°C
Clima subquente	Entre 15°C e 18°C em pelo menos 1 mês
Clima mesotérmico brando	Entre 10°C e 15°C em pelo menos 1 mês
Clima mesotérmico médio	Inferior a 10°C

Fonte: NIMER (1972).

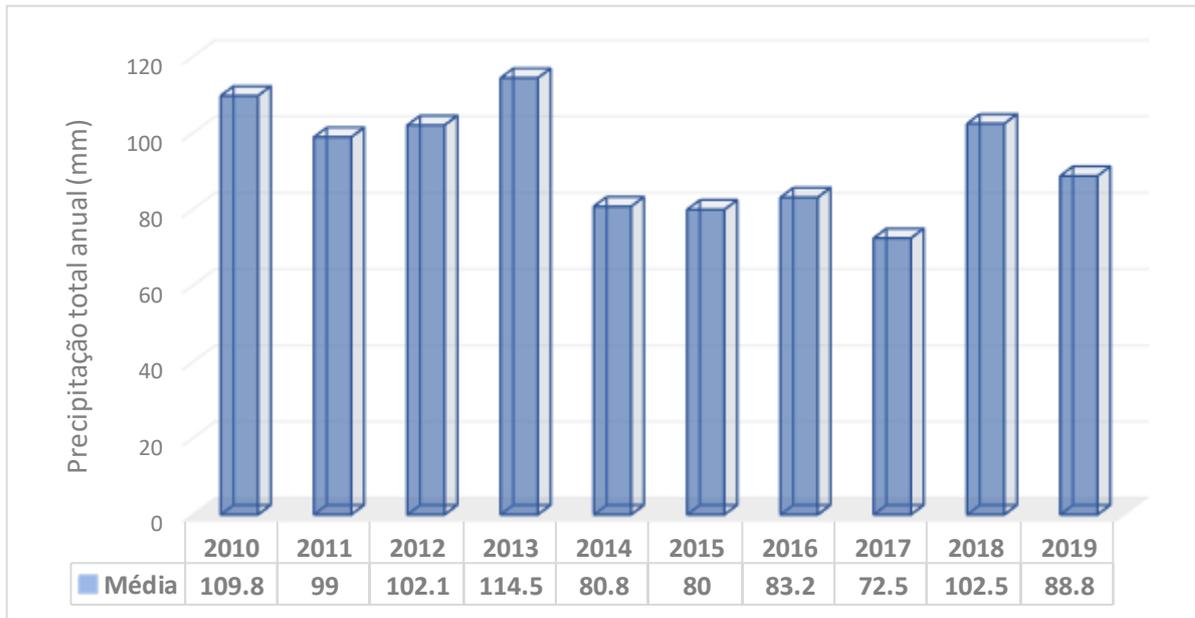
As temperaturas e os índices de pluviosidade no ERJ apresentam uma distribuição muito variável em função da forte influência do relevo. Nas planícies costeiras o clima é quente e úmido, mesotérmico nas áreas mais altas e subquente mais seco nas regiões interiores do estado. As temperaturas e os volumes pluviométricos são mais elevados no verão e menores no inverno. Na área de estudo predomina o clima quente, segundo as informações produzidas pelo IBGE (2018), com a estação seca bem marcada, podendo não ocorrer índices de chuvas durante alguns meses (Figura 3.9).

Figura 3.9 – Escala térmica do clima no Estado do Rio de Janeiro.



Os índices médios de temperatura e pluviosidade na região noroeste são respectivamente, 22,8°C e 1.228 mm (anual) ou 102,3 mm (mensal), considerando o período de 2010 a 2019. O mês mais seco é julho, com 17 mm de precipitação média e no período mais úmido ocorre uma média de 244 mm (CLIMATE-DATA, 2019). De acordo com Silva e Dereczynski (2014), no inverno, as médias de temperaturas máximas podem variar de 26,0 a 27,5°C e no verão entre 32,0 e 33,5°C. A precipitação total anual na região está representada na Figura 3.10, elaborada a partir dos dados fornecidos pelo INPE (2020), onde são observados quatro anos consecutivos (2014-2017) com montante de chuvas abaixo de 90 mm, período correspondente à severa estiagem ocorrida em todo o estado do Rio de Janeiro. Nota-se que no ano de 2019 o índice foi próximo ao do longo período de escassez vivenciado. A Figura 3.11 reúne a média pluviométrica mensal para o período de 2010 a 2019, produzida com a reunião de informações disponibilizadas pelo INPE (2020). Os meses de maio a setembro registraram índices inferiores a 50 mm.

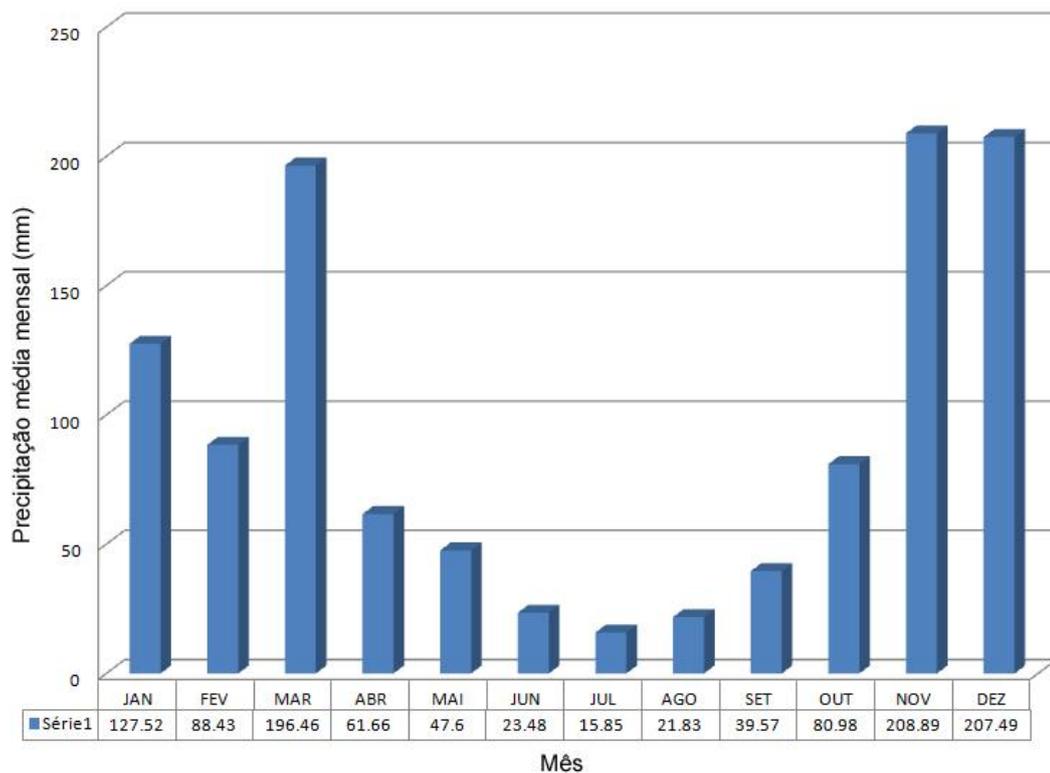
Figura 3.10 – Precipitação total anual (2010 a 2019) da região noroeste do ERJ.



Legenda: Dados da estação meteorológica de Itaperuna.

Fonte: a autora.

Figura 3.11 – Precipitação média mensal da região noroeste do ERJ (2010 a 2019).



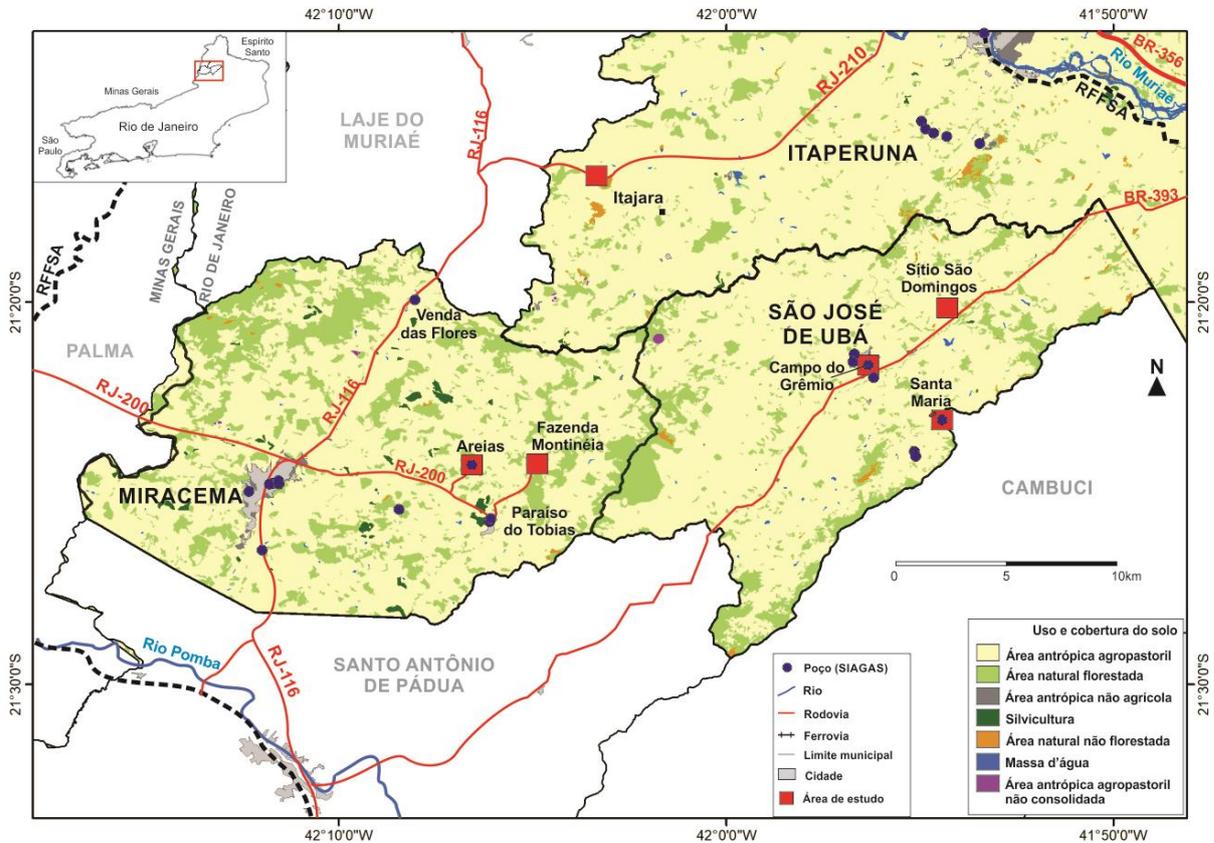
Legenda: Dados da estação meteorológica de Itaperuna.

Fonte: a autora.

### 3.3.2. Uso e cobertura do solo

No noroeste fluminense a proeminência das áreas de pastagem na bacia reflete os efeitos dos diversos ciclos econômicos da região. O manejo inadequado das culturas de café, cana-de-açúcar, algodão e a prática de pecuária extensiva derivaram em uma intensa degradação ambiental. No século XIX a forte expansão da produção cafeeira ocasionou a derrubada e queimada de extensas áreas de floresta. O desenvolvimento de outras culturas agrícolas acentuou ainda mais o desmatamento e resultou na diminuição da capacidade de resiliência dos sistemas. Em função do declínio do café foi introduzida a pecuária leiteira extensiva, sem a devida adoção de práticas de conservação de solo. Estes fatores associados contribuíram para a compactação dos solos, a formação e o aumento de processos erosivos. Nesta conjuntura, os dados de uso e cobertura das terras pesquisadas (Figura 3.12) indicam a predominância de áreas antrópicas agropastoris (86%). Os demais usos representam 14% da região, subdivididos em áreas naturais florestadas (11%) e os outros 3% em áreas de silvicultura (majoritariamente eucalipto), áreas antrópicas não agrícolas, massas d'água (açudes e pequenos lagos artificiais), áreas naturais não florestadas (cordões arenosos, afloramentos rochosos, entre outros); áreas antrópicas agropastoris não consolidadas (definidas segundo o mapeamento realizado em 2014; pois em 2008 essas áreas foram identificadas como floresta) (INEA, 2015). Estes percentuais referem-se às áreas dos municípios de Miracema e São José de Ubá e à região sudoeste de Itaperuna.

Figura 3.12 – Mapa de uso e cobertura do solo dos municípios de Miracema, São José de Ubá e sudoeste de Itaperuna.



Legenda: Áreas antrópicas agropastoris (86%); Áreas naturais florestadas (11%); Silvicultura, Áreas antrópicas não agrícolas, Massas d'água, Áreas naturais não florestadas, Áreas antrópicas agropastoris não consolidadas (3%).

A degradação de áreas ambientais na região noroeste fluminense confirma a necessidade de estudos e implantação de atividades sustentáveis, e também de recuperação de áreas com cobertura vegetal e dos recursos hídricos para preservação do potencial produtivo dos solos, redução dos volumes evaporados de água e controle de processos erosivos.

### 3.3.3. Geomorfologia

O noroeste fluminense do ERJ está inserido em uma ampla depressão interplanáltica, com alternâncias de alinhamentos serranos escalonados. A área é limitada a sul pelo Planalto da Região Serrana e Serra dos Órgãos e, a norte, pelo planalto Sul Capixaba. Na direção oeste o território possui características um pouco semelhantes, estendendo-se pela Zona da Mata mineira. Na orientação leste, esse domínio é limitado pela Baixada Campista e os tabuleiros do Grupo Barreiras (DANTAS *et al.*, 2000).

A região é caracterizada pela presença de colinas, morros e morrotes e alinhamentos serranos com direção estrutural WSW-ENE. O noroeste fluminense possui maciços montanhosos e amplas áreas de pastagem, em terrenos subutilizados. Esta condição de uso dos solos reflete, principalmente, os efeitos do desmatamento, do esgotamento dos solos devido ao manejo com baixo nível tecnológico, do emprego de práticas agrícolas inadequadas e da estiagem prolongada. O relevo tem similaridades com o alinhamento das cristas encontradas no médio Vale do Paraíba do Sul, no qual as feições dos terrenos são predominantemente de colinas, apresentando baixa elevação (Figura 3.13). Estes perfis são comumente encontrados ao longo do interior do estado do Rio de Janeiro (DANTAS *et al.*, 2000).

Figura 3.13 – Feição de colinas com elevação de 290 m, nos arredores da Fazenda Montinéia (Miracema).



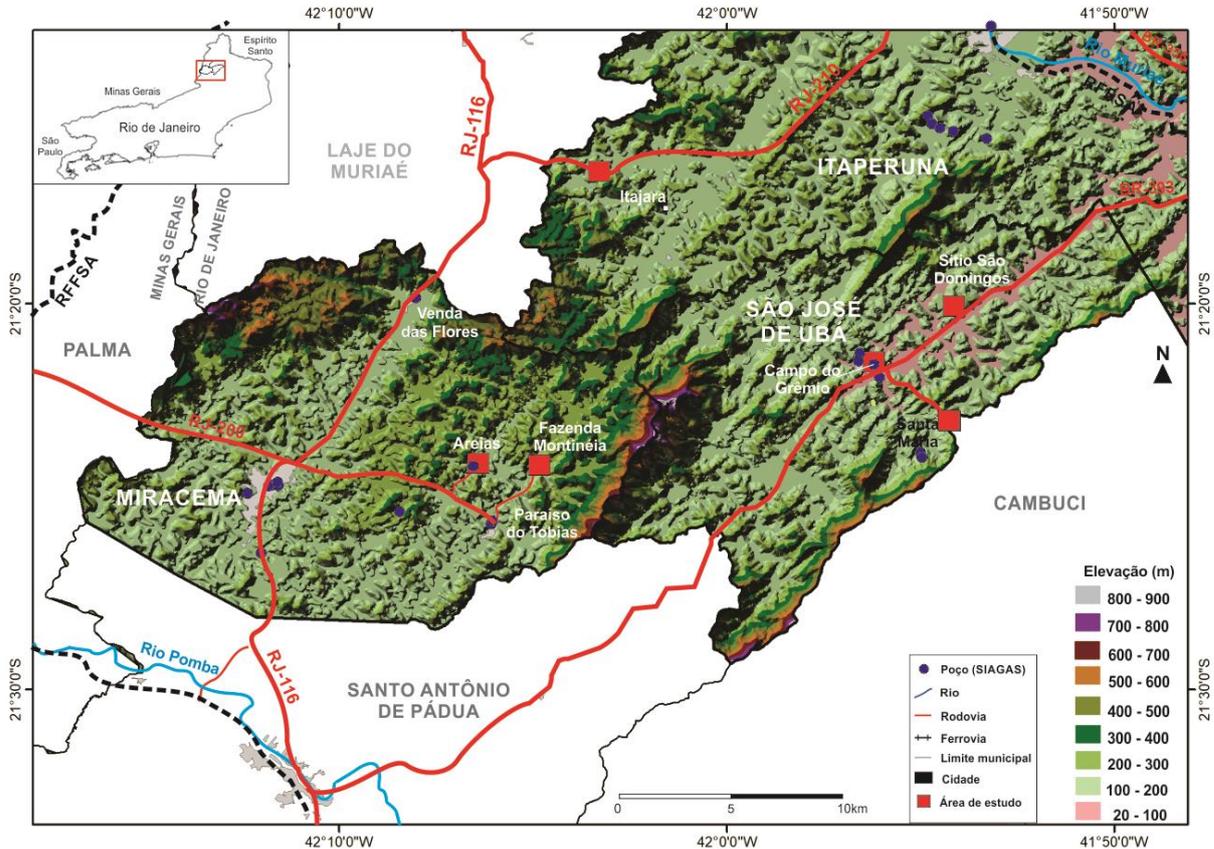
Fonte: a autora (produzida por drone - julho 2019).

As características morfológicas da região são similares a um platô que se estende do Rio Itabapoana ao Rio Pomba, com baixas altitudes. O deslocamento da massa tropical atlântica para o interior do continente e a escassez de barreiras físicas com elevação suficiente para resfriar essas massas de ar e transformá-las em chuvas, define a tendência à aridez do Noroeste Fluminense. (SOFFIATI, 2018).

A área de estudo é caracterizada por elevações máximas de 900 metros, com predomínio de altitudes entre 100 e 300 metros (INEA, 2018). A divisa entre os municípios

de Miracema e São José de Ubá é marcada pela serra com altitude de 900 metros (INEA, 2018), alinhada segundo a direção NE-SW (Figura 3.14).

Figura 3.14 – Mapa de elevação dos municípios de Miracema, São José de Ubá e sudoeste de Itaperuna.



Fonte: a autora.

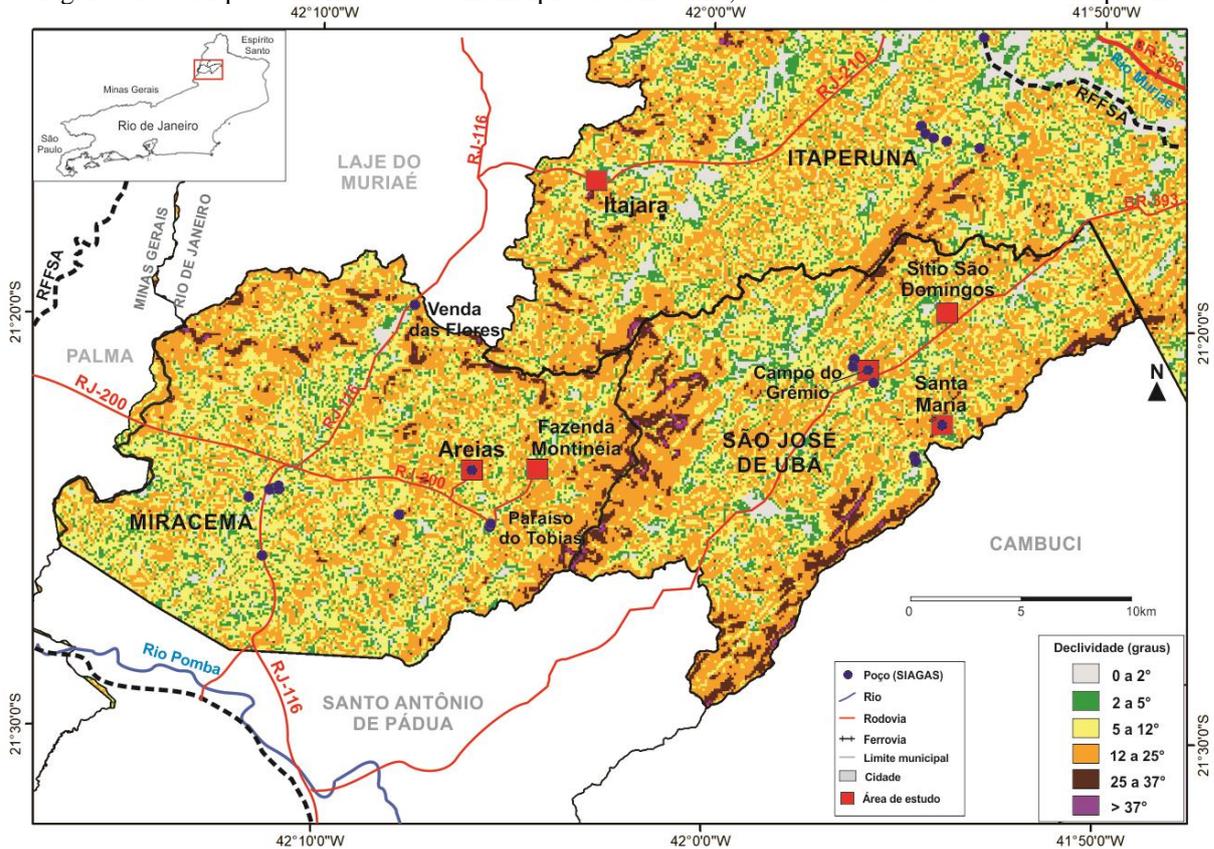
A morfologia do terreno influencia na recarga dos aquíferos por meio da altitude relativa e dos graus de declividade<sup>11</sup>. Em locais mais íngremes (declive > 20%) a água esco superficialmente em alta velocidade, diminuindo as taxas de infiltração do volume precipitado (KALIRAJ; CHANDRASEKAR; MAGESH, 2014). Em razão destes aspectos, os planos elevados e intermediários (altos regionais), com baixas declividades, solos estruturados, profundos e permeáveis representam os melhores locais para a recarga dos aquíferos (SILVEIRA; USUNOFF, 2009).

Segundo os dados de declividade da CPRM (2010), a superfície topográfica da área pesquisada possui desníveis majoritariamente entre 2 e 25° (Figura 3.15), cujo relevo varia de

<sup>11</sup> A declividade representa a medida de inclinação, expressa em graus ou percentual, do relevo em relação ao plano horizontal (AMBDATA, 2020).

suave a forte ondulado (LUMBRERAS *et al.*, 2004), com declividades de 3 a 8% e 20 a 45%, respectivamente.

Figura 3.15 – Mapa de declividade dos municípios de Miracema, São José de Ubá e sudoeste de Itaperuna.



Nos locais com declividade inferior a 20%, os solos geralmente são pouco desenvolvidos (LUMBRERAS *et al.*, 2004), estabelecendo uma limitação à recarga dos reservatórios subsuperficiais. Desta maneira, os maiores volumes de água são armazenados nas fraturas das rochas ou nos espaços entre diferentes litologias.

### 3.3.4. Vegetação

A Mata Atlântica cobria quase todo o território do Rio de Janeiro até a chegada dos Portugueses no Brasil. Uma situação bem diferente foi estimada pela Secretaria de Estado do Ambiente (SEA), em 2015, indicando que no estado restaram 17% de vegetação deste bioma, onde são identificados três tipos de florestas: a Ombrófila Densa, a Estacional Semidecidual e a Ombrófila Mista. Os remanescentes das duas primeiras são encontrados no noroeste do estado (CEPERJ, 2019).

A vegetação de uma região pode sofrer influência das variações de clima, relevo e topografia de uma determinada área, pela geologia ou por características intrínsecas do local, proporcionando uma grande diversidade de ambientes e ecossistemas associados.

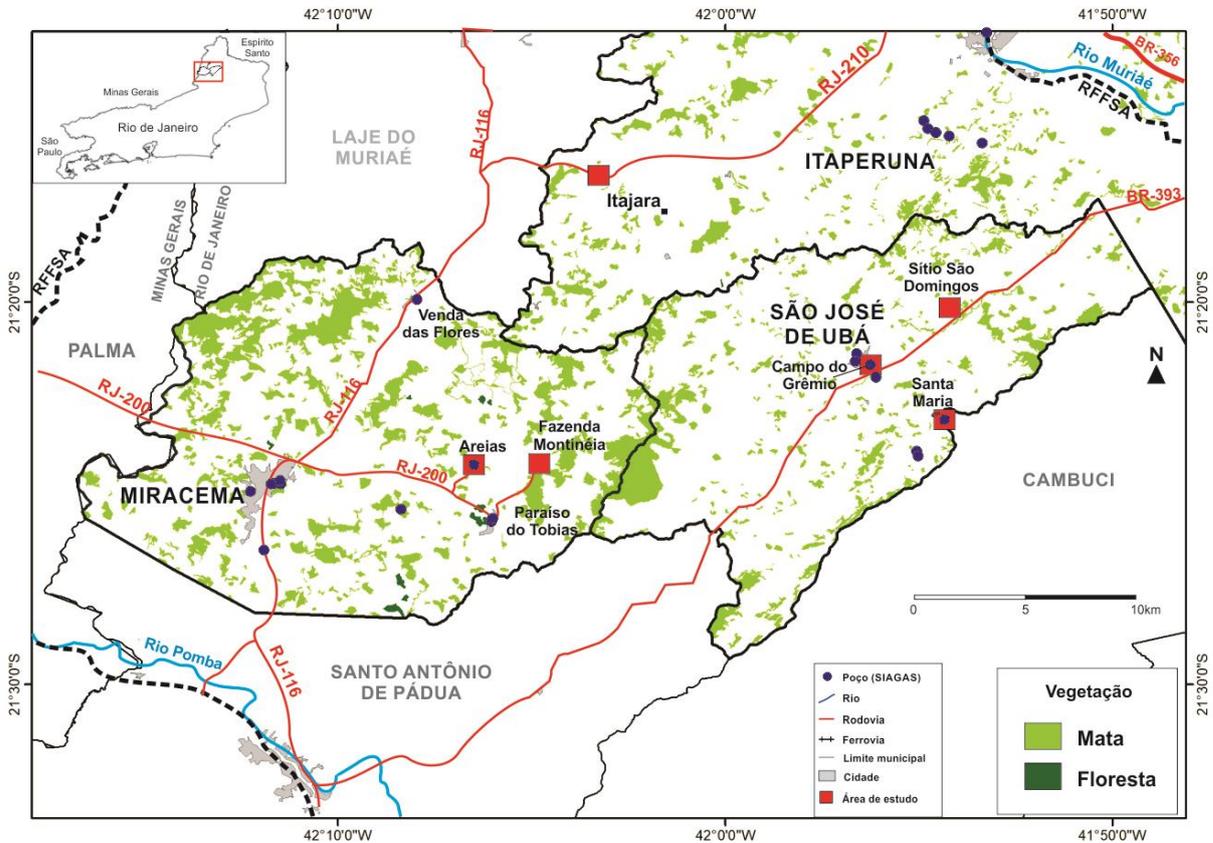
A floresta estacional semidecidual ou floresta subcaducifólia representa a maior parcela da formação vegetal nativa do noroeste fluminense (SOFFIATI, 2018). No sul da região apenas uma pequena parte constitui-se em floresta ombrófila densa, mais precisamente no município de São Fidélis-RJ, próximo ao Parque Estadual do Desengano (INEA, 2015; DANTAS *et al.*, 2000), onde os fatores climáticos tropicais, com temperaturas médias de 25°C e os elevados índices de pluviosidade (bem distribuídos ao longo do ano) permitem a manutenção de uma vegetação perenifólia. Estes elementos determinam uma situação bioecológica praticamente isenta de períodos secos nesta parcela da região (IBGE, 2012; DANTAS *et al.*, 2000).

A fitofisionomia da floresta estacional semidecidual caracteriza-se por apresentar dupla sazonalidade climática, com um período tropical em que ocorrem as chuvas de verão seguidas por estiagens acentuadas; e outro subtropical, com seca fisiológica provocada pelo frio do inverno (RAHAL, LEAL e PEDROSO-DE-MORAES, 2015). O comportamento fenológico de perda foliar pode ocorrer em correspondência com a alternância da sazonalidade, relativa à deficiência hídrica ou à queda de temperatura do período. As temperaturas médias mensais são inferiores a 15°C, ocasionando o repouso fisiológico e a queda parcial da folhagem.

A Mata Atlântica em todo o ERJ foi extensamente retirada durante o período colonial, principalmente para ceder espaços às culturas de café e cana-de-açúcar e, continuou a ser suprimida e degradada para atender às demandas agrícolas e pecuárias de uma população crescente. O plantio de uma única cultura, em uma mesma área, ao longo dos anos acarretou gradativamente no empobrecimento dos solos. Este tipo de manejo propiciou a formação de processos erosivos, comprometendo as condições de uso da terra pela perda de seus nutrientes e constituintes.

Em virtude da extensa ocupação do solo pelas atividades agrícolas e pecuárias, os remanescentes da Mata Atlântica no noroeste do ERJ correspondem a apenas 9,64% da cobertura florestal original. Esta pequena parcela de vegetação constitui-se quase em sua totalidade de fragmentos de matas secundárias (Figura 3.16) (INEA, 2018) com certo grau de degradação (LUMBRERAS *et al.*, 2004).

Figura 3.16 – Remanescentes de vegetação dos municípios de Miracema, São José de Ubá e sudoeste de Itaperuna.



Fonte: a autora.

Nos relatórios sobre os estudos realizados pela Fundação CIDE (Centro de Informações e Dados do Rio de Janeiro) sobre o Índice de Qualidade dos Municípios (IQM – Verde I e II), anos de 1994 e 2001, dentre os inúmeros elementos que integram os documentos são apresentados o rol de cobertura vegetal remanescente e as áreas necessárias para a implantação de corredores ecológicos, visando interligar os fragmentos florestais (CIDE, 2001 e 2003). Este diagnóstico permitiu indicar os locais prioritários para o reflorestamento, tendo em vista que o isolamento de espécies em trechos de mata exerce elevada pressão sobre os recursos existentes, afetando a capacidade de suporte dos ambientes impactados. O IQM de Itaperuna, Miracema e São José de Ubá relativo a esses aspectos constam na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Índice de Qualidade dos Municípios da área de estudo (IQM - VERDE).

Município/RJ	Vegetação primária (%)	Vegetação secundária (%) (1994)	Vegetação secundária (%) (2001)	Corredores ecológicos	
				Área para a implantação (ha)	% do território municipal
Itaperuna	0,2	10	10	3.982	3,6
Miracema	0,6	14	20	4.410	14,6
São José de Ubá	Inexistente	10	5	486	1,9

Legenda: Remanescentes de vegetação nos municípios e as áreas necessárias para a implantação de corredores ecológicos.

Fonte: a autora.

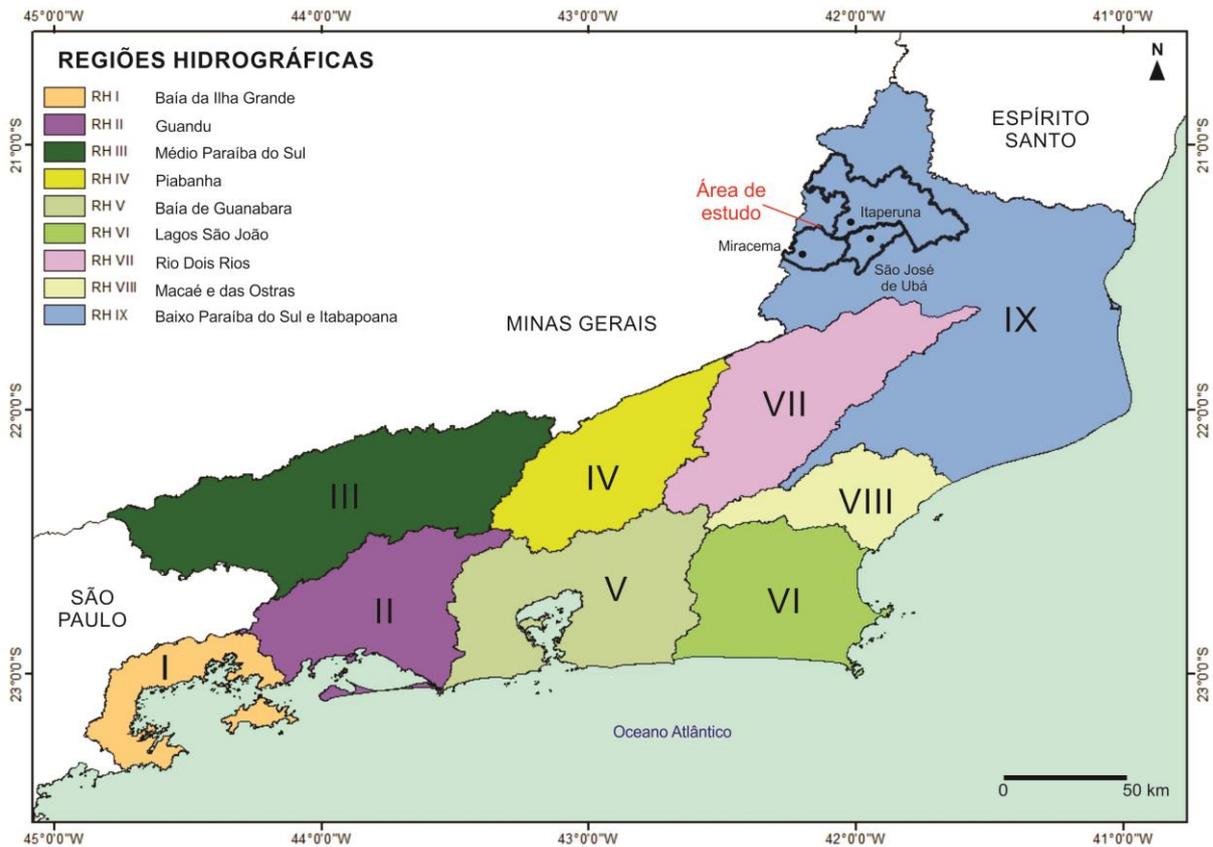
Os desmatamentos aumentam o risco de extinção de espécies da fauna, flora e acentuam a aridez da região, deixando vulneráveis as áreas das nascentes dos principais tributários dos rios Pomba e Muriaé (DANTAS *et al.*, 2000), fontes de abastecimento hídrico dos municípios investigados. A supressão da flora estabelece o escoamento superficial das águas de chuvas pelo solo desnudo. Isto acontece devido à perda da capacidade de infiltração da água no subsolo, resultado da ausência de vegetação apta a conduzir os volumes precipitados a níveis inferiores. Em função do impacto das gotas de chuva, a estrutura superficial dos solos pode ser alterada, formando uma camada onde os sedimentos finos dispõem-se na forma de lâminas. O choque das gotas na camada nua do solo causa a compactação das partículas finas e conseqüentemente a selagem dos poros, dificultando a penetração da água.

Deste modo, onde o solo está mais exposto, o volume de água de infiltração e de armazenamento nos aquíferos subterrâneos é menor. Estas circunstâncias e a fragilidade do sistema florestal do noroeste do estado ressaltam, portanto, a deficiência hídrica nos períodos de estiagens prolongadas.

### 3.3.5. Hidrografia

O estado do Rio de Janeiro é dividido em nove regiões hidrográficas (Figura 3.17) (INEA, 2017). A área de estudo está inserida na região hidrográfica do Baixo Paraíba do Sul e Itabapoana (RH IX) e compreende 13.460 km<sup>2</sup>. A área total da bacia do rio Paraíba do Sul é de aproximadamente 61.307 km<sup>2</sup> e abrange três Estados: São Paulo (13.934 km<sup>2</sup>), Rio de Janeiro (26.674 km<sup>2</sup>); e Minas Gerais (20.699 km<sup>2</sup>) (AGEVAP, 2018).

Figura 3.17 – Mapa das regiões hidrográficas do ERJ, com a localização da área de estudo.



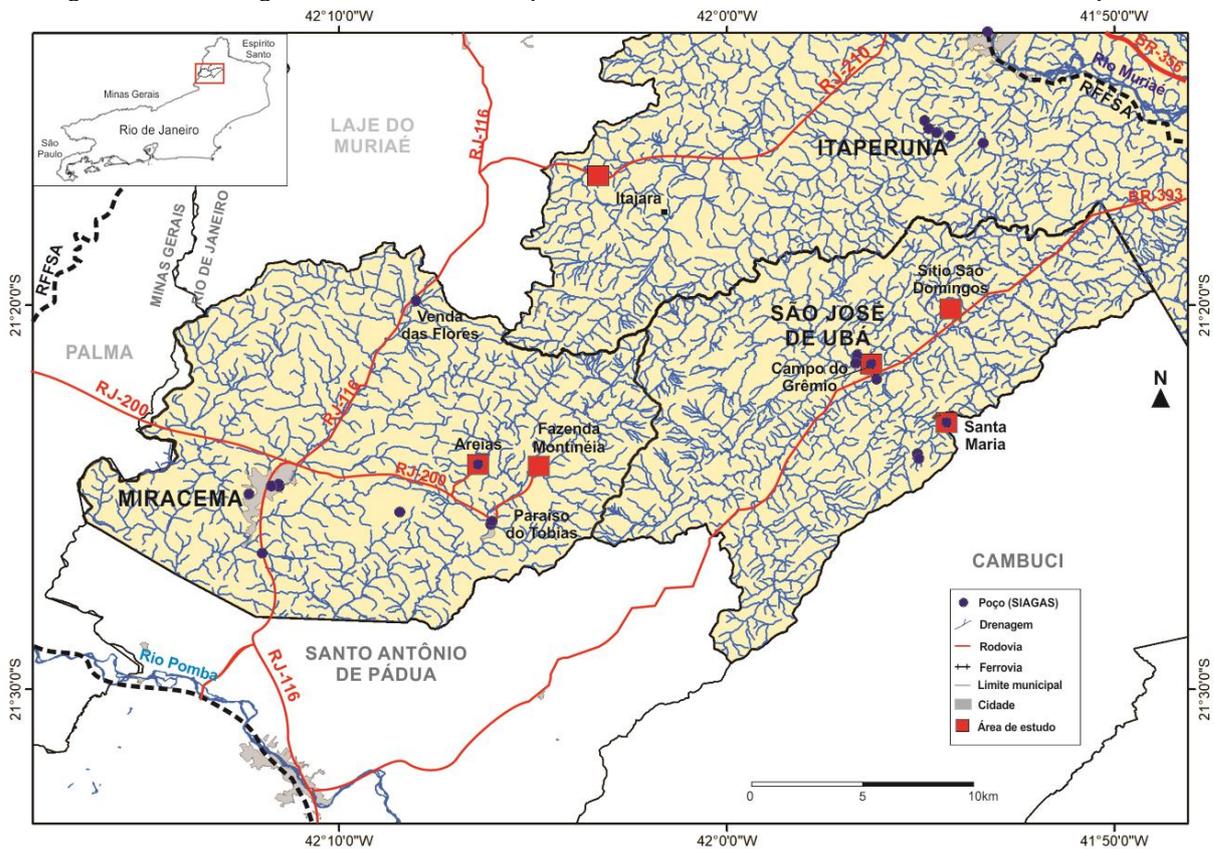
Fonte: a autora.

O rio Paraíba do Sul é formado pela confluência dos rios Paraibuna e Paraitinga, com extensão total aproximada de 1.130 km, desde a nascente na Serra da Bocaina, no Estado de São Paulo até a sua foz no Oceano Atlântico, próximo à cidade de São João da Barra (RJ) (AGEVAP, 2018). O rio Paraíba do Sul e os seus afluentes se encontram em processo de degradação, principalmente pelas intervenções antrópicas na bacia, o que torna os episódios críticos mais frequentes. Os principais cursos hídricos da RH IX que envolvem a área investigada são o Rio Muriaé, a norte, e o Rio Pomba, a sul (Figura 3.18). No trecho baixo da bacia do Paraíba do Sul e nas sub-bacias dos afluentes dos rios Pomba e Muriaé constantemente acontecem enchentes de caráter regional, acarretando prejuízos ambientais, sociais e econômicos. No ano de 2007, um evento de fortes chuvas culminou no rompimento de uma barragem de rejeitos da mineradora Rio Pomba Cataguazes, no qual cerca de dois milhões de metros cúbicos de resíduos de bauxita alcançaram o rio Fubá, afluente direto do rio Muriaé. A contaminação atingiu municípios em Minas Gerais e no Rio de Janeiro, inclusive Itaperuna-RJ e São José de Ubá-RJ, cessando o fornecimento de água e ocasionando o desalojamento e a perda de bens de diversas famílias, além da mortalidade da ictiofauna (ANA, 2010). Estes aspectos destacam a fragilidade do sistema de abastecimento superficial,

condicionado qualitativamente pelas inúmeras atividades econômicas e pelo modelo de uso e ocupação dos solos, deixando evidente a necessidade de se recorrer a fontes alternativas de abastecimento de água, mediante a ocorrência de eventos críticos.

Os aspectos físicos da bacia na área investigada são de um padrão de drenagem definido pelas estruturas, falhas e fraturas do terreno, com direções NE-SW e NW-SE, refletindo um controle geológico na sua orientação. A rede hidrográfica nessas áreas é representada por correntes fluviais com extensão de até 1 km (Figura 3.18) (IBGE, 2018), com um padrão dendrítico devido às formas arborescentes e, morfologias de canal dos tipos meandrante e anastomosante na maioria dos cursos fluviais.

Figura 3.18 – Hidrografia da área dos municípios de Miracema, São José de Ubá e sudoeste de Itaperuna.



Legenda: O mapa contempla a localização dos poços cadastrados no SIAGAS e os setores investigados por intermédio da aplicação dos métodos geofísicos.

Fonte: a autora.

As águas que escoam pelo território, delimitadas pelos interflúvios formam as microbacias de cada um dos municípios pesquisados (Quadro 3.1), as quais desaguam nos rios Pomba e Muriaé e, finalmente no Rio Paraíba do Sul.

Quadro 3.1 – Principais microbacias dos municípios estudados.

<b>Município-RJ</b>	<b>Microbacia</b>	<b>Fonte</b>
Itaperuna	Córrego Marambaia (Campinho); Ribeirão Limoeiro; Valão do Bambuí; Boa Ventura; Córrego Paraíso; Córrego das Posses; Valão do Cedro; Córrego do Facão; Valão da Jabuticaba; Córrego Boa Vista; Córrego do Ouro; Córrego da Onça; Ribeirão Paixão; São Domingos; Ribeirão Salgada I; Ribeirão Salgada II; Ribeirão Salgada III;	SEMAI, 2017
Miracema	Alto Ribeirão do Bonito; Médio Ribeirão do Bonito; Baixo Ribeirão do Bonito; Alto Ribeirão Santo Antônio; Médio Ribeirão Santo Antônio; Baixo Ribeirão Santo Antônio; Córrego Carangola.	SEA, 2015
São José de Ubá	Santa Maria; Córrego Ubá; Córrego Colosso; Rio São Domingos/Valão da Serra; Valão do Chalé.	SEA, 2015

Fonte: a autora.

Os recursos hídricos da RH IX no noroeste do ERJ são severamente afetados pelos sedimentos advindos dos processos erosivos desencadeados pelo desmatamento, pelas pastagens sem manejo e pelos resíduos das atividades agropecuárias. Essas águas com a qualidade comprometida irão abastecer os municípios da região. A água captada para o fornecimento à população do município de Miracema-RJ é realizada no Rio Pomba. O rio recebe uma carga poluidora além de sua capacidade de depuração ainda no território de Minas Gerais - MG, com contribuições de esgotos domésticos e resíduos de origem industrial e agropecuária. Esta situação se replica em Miracema-RJ e São José de Ubá-RJ, que têm como manancial de abastecimento o rio Muriaé. Em razão da degradação qualitativa de suas águas, a prefeitura de São José de Ubá propõe transferir a captação efetuada no município de Itaperuna-RJ para outro curso hídrico, contudo, os futuros substitutos também se encontram deteriorados (INEA, 2018).

O fornecimento de água dos municípios investigados é realizado pela Companhia Estadual de Águas e Esgotos (CEDAE) do Rio de Janeiro. A concessionária atende a uma população de 87.000 pessoas em Itaperuna, correspondendo a 90% do total do município; 26.000 pessoas em Miracema (96%) e 3.600 pessoas em São José de Ubá (50%) (CEDAE, 2018). Estes percentuais de abrangência da rede de abastecimento demonstram que em Miracema e Itaperuna a maior parcela do território dispõe do serviço público de água, enquanto São José de Ubá contempla apenas a metade do serviço fornecido pela CEDAE.

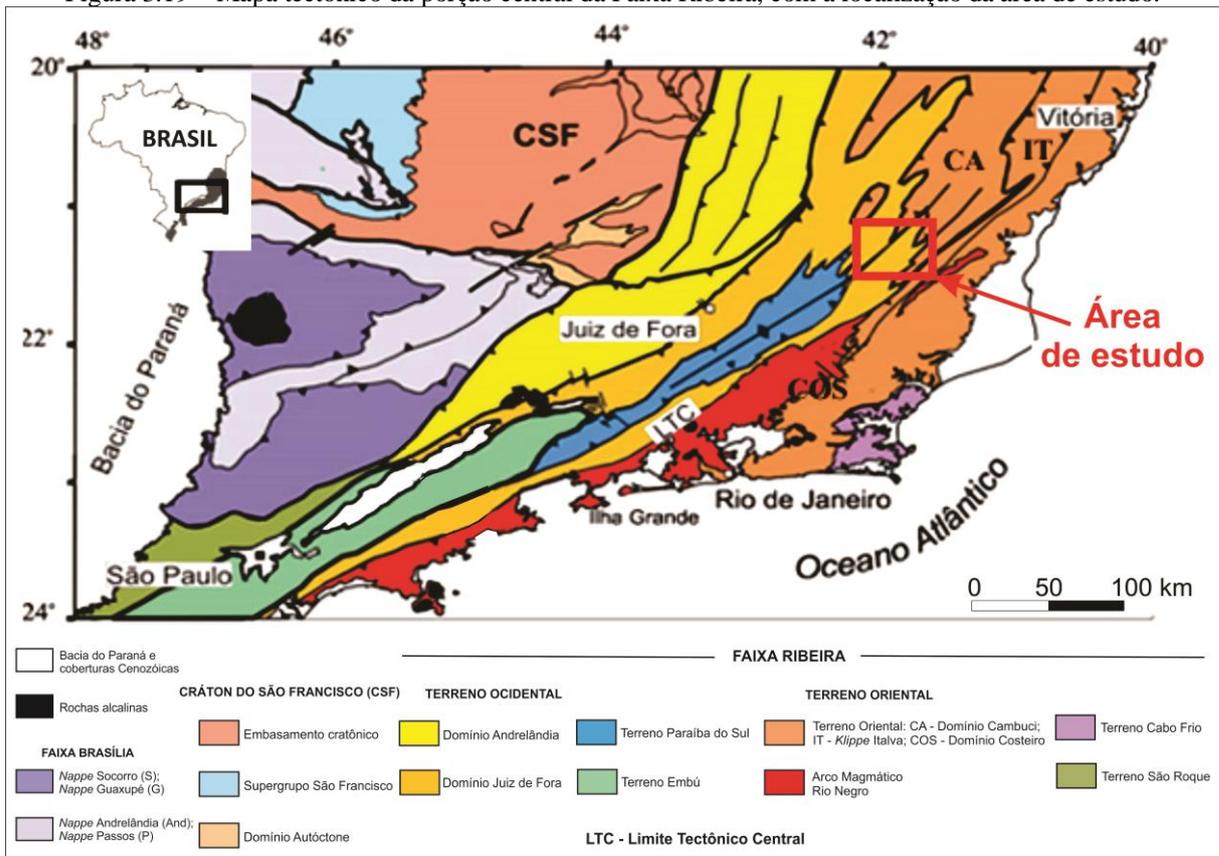
Este cenário ressalta a existência de fontes alternativas de captação de água, sobretudo em São José de Ubá, onde há uma demanda preponderante de água para a irrigação da cultura do tomate. A diretriz para o abastecimento de água relativa ao período 2010 a 2030, em São José de Ubá-RJ, prevê o aumento da capacidade de produção de água em 5 L/s após 2025 (INEA, 2018).

### 3.3.6. Geologia

A área de estudo deste trabalho está inserida na denominada Faixa Ribeira, um cinturão orogênico que corresponde a um conjunto de rochas formadas devido à interação do Paleocontinente do São Francisco com outras placas tectônicas, arcos de ilhas e a porção sudoeste do Cráton do Congo, atualmente parte centro-sul da África. Essa interação ocorreu entre 1,54 Ga e 0,54 Ga (HEILBRON *et al.*, 2008) e foi responsável pela formação do supercontinente Gondwana Ocidental. Eventos tectônicos posteriores, como a separação da América do Sul da África com a abertura do Oceano Atlântico, atuaram na configuração atual do continente sul-americano.

A Faixa Ribeira estende-se por aproximadamente 1400 km, ao longo da costa do sudeste do Brasil e possui estruturas geológicas, tipo falhas, fraturas e zonas de cisalhamento, com orientação preferencial NE-SW e conjuntos de rochas com características geológicas próprias e sem relações genéticas com os demais. Cada conjunto é denominado de terreno tectono-estratigráfico. Na porção sudeste do Brasil, Heilbron (1993, 1995), Heilbron *et al.* (1998, 2000), Trouw *et al.* (2000), Heilbron e Machado (2003) reconheceram cinco terrenos tectono-estratigráficos, denominados de Ocidental, Oriental, Embu, Paraíba do Sul, e Cabo Frio (Figura 3.19).

Figura 3.19 – Mapa tectônico da porção central da Faixa Ribeira, com a localização da área de estudo.



Fonte: Adaptado de Heilbron *et al.*, (2008).

A área pesquisada está inserida no Terreno tectono-estratigráfico Ocidental. Este terreno representa a margem litorânea do paleocontinente do São Francisco, cuja divisão por Heilbron *et al.* (1995) foi estabelecida observando as características de dois conjuntos de rochas com estruturas diferentes, denominados de domínios estruturais: Andrelândia e Juiz de Fora. O Domínio Andrelândia é formado por rochas de origem ígnea (ortognaisses) de idade paleoproterozoica (entre 2,5 Ga e 1,6 Ga) que formam o embasamento desse domínio, coberto por rochas sedimentares que foram metamorfasadas (rochas metassedimentares) entre 1 Ga e 0,54 Ga (neoproterozoico) e nomeadas de Megassequência Andrelândia (PACIULLO, 1997). O Domínio Juiz de Fora corresponde a uma intercalação de rochas ígneas granulíticas (nomeado de Complexo Juiz de Fora) com rochas metassedimentares da Megassequência Andrelândia.

Na área de estudo predominam as rochas do tipo granulito e ortogranulito pertencentes ao Complexo Juiz de Fora (Figura 3.20A), intercaladas com rochas do tipo granada-biotita-gnaiss (Grupo Raposos da Megassequência Andrelândia); (Figura 3.20B), contendo lentes de litologias como anfíbolito e quartzito. No município de São José de Ubá destaca-se a presença

de rocha ígnea denominada de granitoide São João do Paraíso (Figura 3.20C), deformada e intrudida no Complexo Juiz de Fora e na Megassequência Andrelândia. Em Itaperuna-RJ essas rochas intrusivas recebem o nome de Suíte Salvaterra e em Miracema-RJ designam-se Suíte Pedra Bonita e Salvaterra (Figura 3.21).

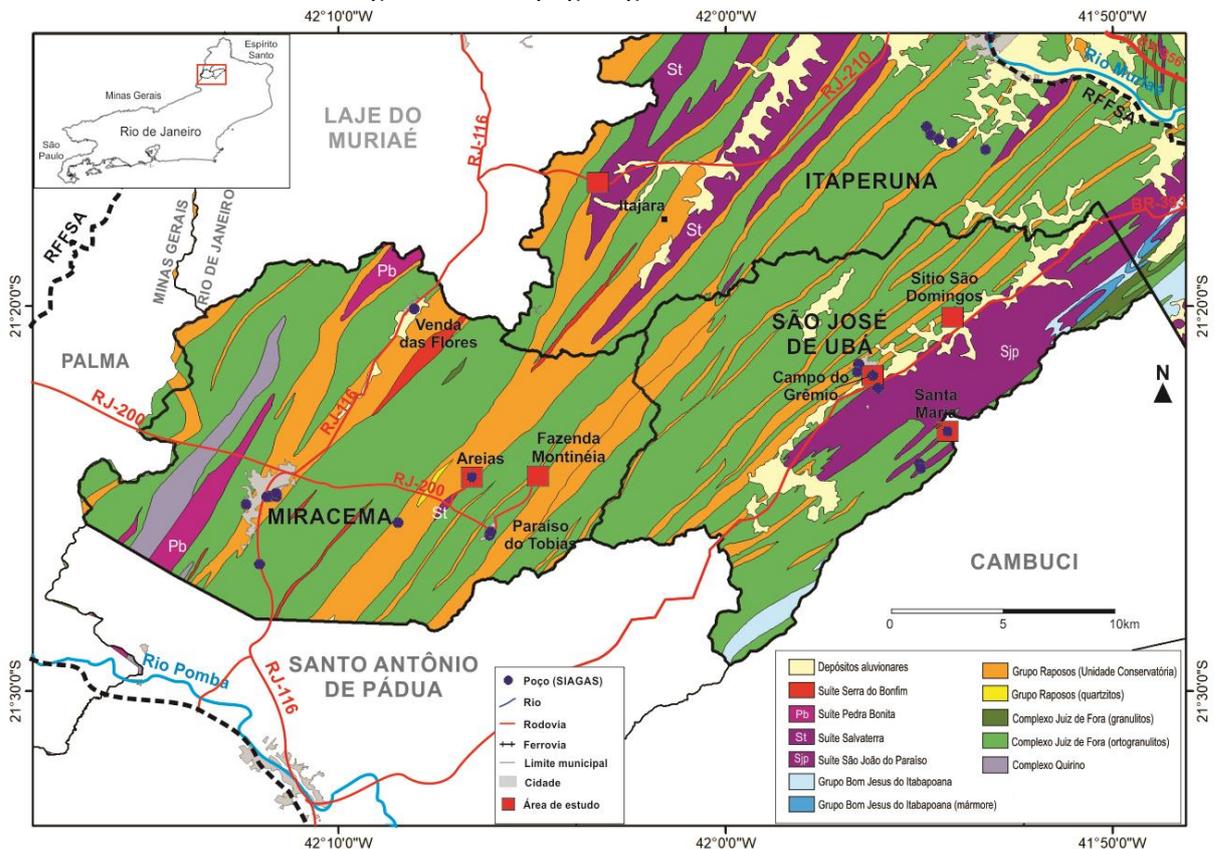
Figura 3.20 – Exemplos de rochas da área de trabalho.



Legenda: A) Ortogranulito do Complexo Juiz de Fora; B) Granada biotita gnaissé do Grupo Raposos; C) Granitoide São João do Paraíso.

Fonte: A) André (2014); B) a autora; C) Ferreira *et al.*, 2020.

Figura 3.21 – Mapa geológico da área de estudo.



Fonte: Adaptado de Heilbron *et al.*, (2016).

Os paragneisses e ortogranulitos correspondem às rochas maciças e compactas e, portanto, não apresentam espaços vazios entre os seus minerais. Quando não intemperizadas, essas rochas permitem o armazenamento de água subterrânea por meio de fraturas e falhas. Ao sofrer intemperismo, a rocha alterada (saprólito) passa a ter espaços (poros) que favorecem a passagem e o armazenamento de água. A superfície de contato entre duas rochas (intemperizadas ou não) também favorece a percolação e o acúmulo de água entre os seus espaços, atuando, inclusive, como importante fator de recarga.

As fraturas e falhas são importantes discontinuidades e podem afetar o fluxo hidráulico de diferentes formas. Em litologias com baixa porosidade essas estruturas constituem canais para os fluidos e representam um alvo potencial para a perfuração de poços e obtenção de água subterrânea, contudo, o núcleo da falha tende a ser menos permeável devido ao conteúdo de minerais argilosos secundários, denominado *gouge* de falha. A ocorrência de diques em maciços rochosos graníticos ou gnáissicos pode influir na dinâmica hidrológica de modo similar às falhas, onde os contatos entre as rochas consistem em zonas permeáveis e locais capazes de armazenar expressivos volumes de água. Nas rochas muito porosas ocorre o inverso, as falhas podem atuar como barreiras ao fluxo de fluidos (FOSSEN, 2017).

### 3.3.7. Solos

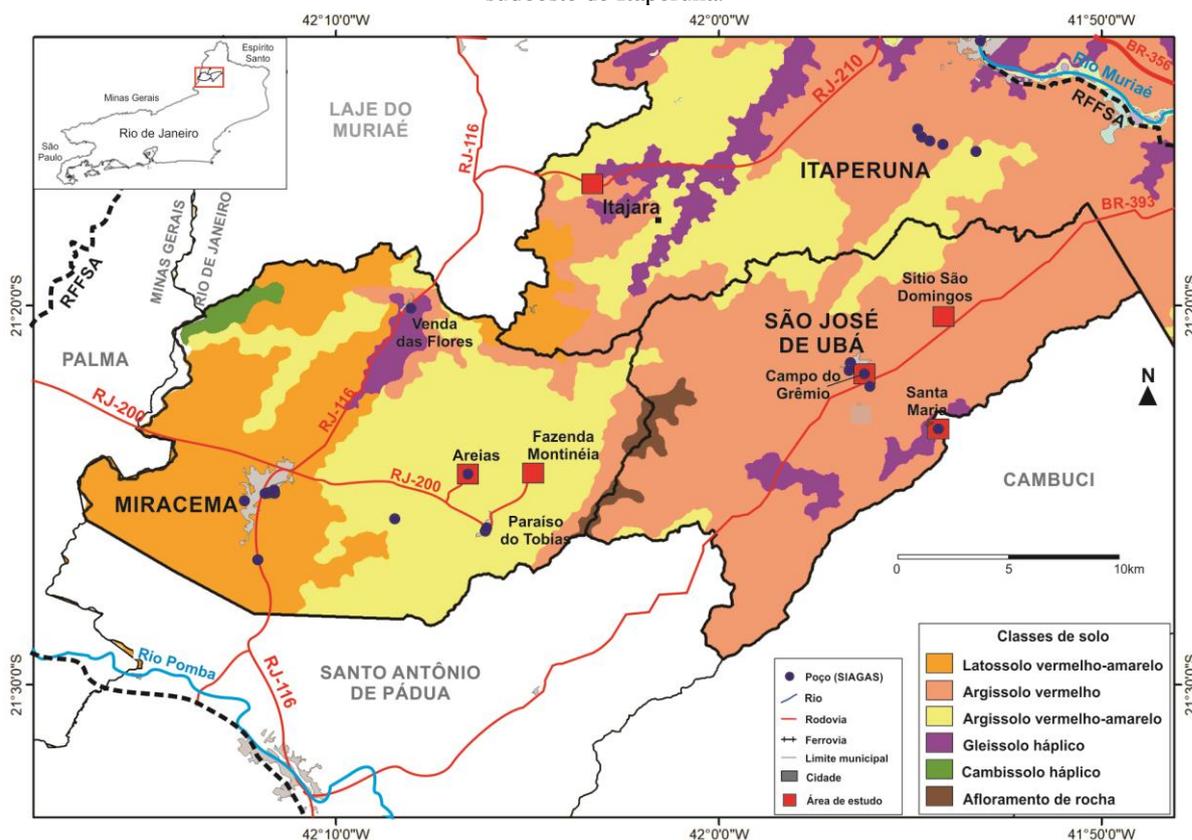
Na região noroeste do ERJ predominam os solos formados a partir do embasamento cristalino e classificados como latossolo, argissolo e cambissolo. Nos municípios de Miracema-RJ, Itaperuna-RJ e São José de Ubá-RJ, de acordo com a EMBRAPA (2003) estão presentes as classes de solo latossolo, argissolo, cambissolo, gleissolo, planossolo hidromórfico e neossolo flúvico onde as duas primeiras abrangem a maior parcela do território, com cerca de 90% (Figura 3.22) (EMBRAPA, 2003). As classes de argissolo e cambissolo apresentam mais suscetibilidade à erosão em relação ao latossolo e ao gleissolo, em iguais condições de relevo. No argissolo isto se deve principalmente ao fluxo de água ocorrer de maneira mais rápida no horizonte A e muito lenta em subsuperfície, em decorrência da acumulação de argila no horizonte B, favorecendo a lixiviação das camadas superficiais. No cambissolo há a possibilidade de acontecer processos erosivos se os horizontes A + B (*solum*) forem pouco espessos e/ou a declividade for acentuada.

O termo háplico deriva principalmente do horizonte A ser mais claro do que um categorizado como, por exemplo, chernozêmico ou húmico. Isto significa menos teor de

matéria orgânica nesta camada e, também, por não atender aos critérios das demais classes (EMBRAPA, 2018).

Os planossolos e neossolos têm alta susceptibilidade à erosão. Nos planossolos isto ocorre devido ao gradiente textural elevado, pouca profundidade e os baixos teores de matéria orgânica. Em relação aos neossolos flúvicos os fatores contribuintes são a pouca profundidade e baixa intensidade dos processos pedogenéticos tornando-os sujeitos à erosão hídrica.

Figura 3.22 – Distribuição espacial das classes de solos dos municípios de Miracema, São José de Ubá e sudoeste de Itaperuna.



Fonte: a autora.

As classes de solo predominantes nas localidades de Campo do Grêmio, Sítio São Domingos (ambos no município de São José de Ubá), Areias e Montinéia (município de Miracema) e Itajara (município de Itaperuna) correspondem a argissolo vermelho a vermelho-amarelo, apresentando discreta diferença textural, o que favorece a infiltração de água no subsolo e contribui para uma capacidade elevada de armazenamento de água e de recarga para os aquíferos. Esses solos são indicados para o desenvolvimento de atividades agrícolas. Na localidade de Santa Maria (município de São José de Ubá) predomina o gleissolo háplico, desenvolvido a partir de sedimentos não consolidados e com textura argilo-arenosa e em área

de topografia suave. O gleissolo mantém a água estagnada internamente ou a saturação ocorre por fluxo lateral.

Na Tabela 3.4 consta a extensão territorial de cada classe de solo presente nos municípios a partir dos dados da Embrapa (2003).

Tabela 3.4 – Área de ocorrência das classes de solo (em km<sup>2</sup> e % da área), por município.

<b>Classe de solo</b> <b>(Área abrangida - km<sup>2</sup>)</b>	<b>Miracema</b> (303,27)	<b>Itaperuna</b> (1.106,69)	<b>São José de Ubá</b> (249,69)
Latossolo vermelho-amarelo	127,24 (42%)	186,70 (17%)	--
Argissolo vermelho	34,55 (11%)	523,95 (47%)	216,66 (87%)
Argissolo vermelho- amarelo	126,38 (41%)	261,40 (23%)	17,86 (7%)
Gleissolo háplico	7,78 (3%)	104,98 (10%)	9,65 (4%)
Cambissolo háplico	4,95 (2%)	--	--
Planossolo hidromórfico	--	21,25 (2%)	--
Neossolo flúvico	--	8,41 (1%)	--
Afloramento de rocha	2,37	--	5,52

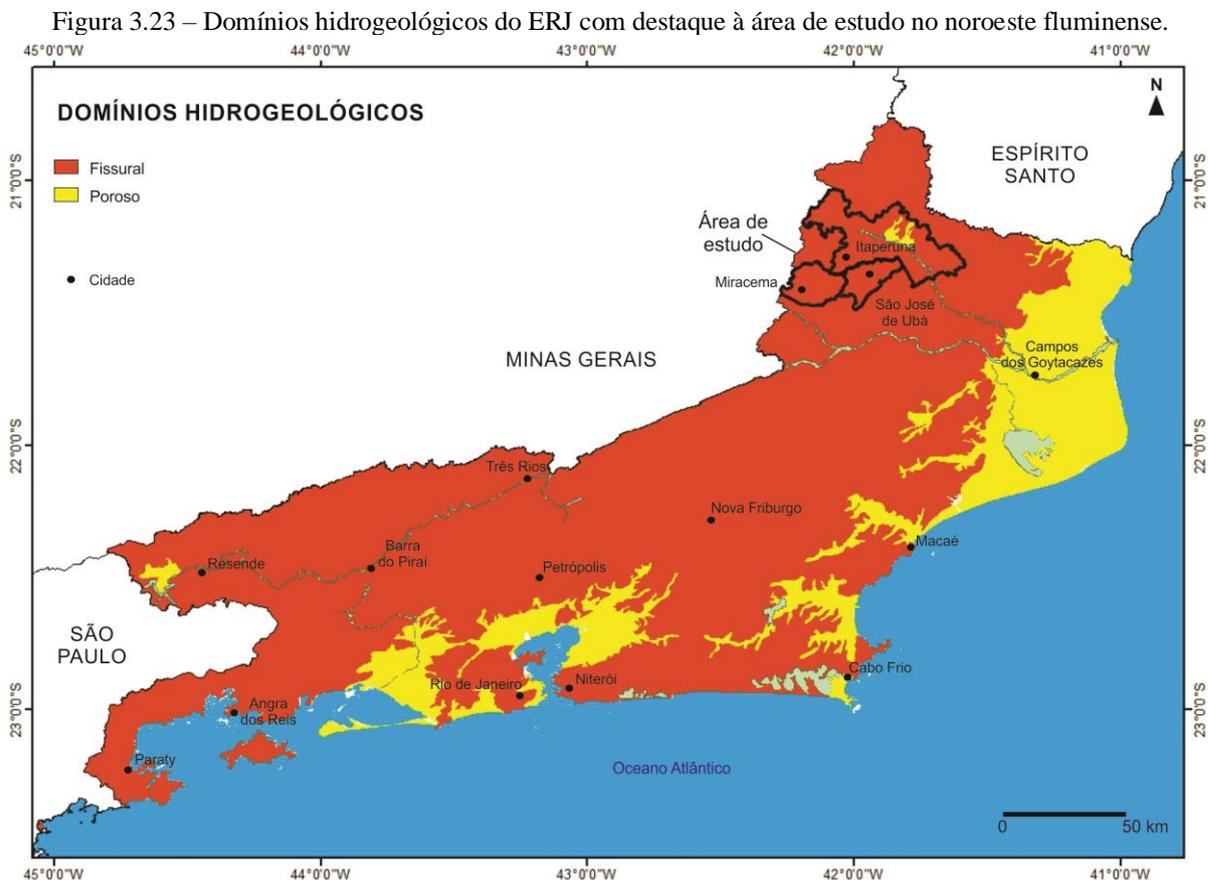
Fonte: a autora.

### 3.3.8. Hidrogeologia

Os atributos litológicos, estratigráficos e estruturais dos solos, sedimentos e rochas condicionam o processo de infiltração da água no subsolo e a maneira como as unidades geológicas armazenam e transmitem a água em subsuperfície. Esses aspectos também têm influência direta sobre a quantidade e a qualidade da água, inclusive nas reservas subterrâneas.

No estado do Rio de Janeiro, cerca de 80% do território é constituído por rochas cristalinas, ígneas e metamórficas, em que a porosidade consiste nos espaços existentes nas fissuras, fraturas ou falhas da matriz rochosa. Devido a estas particularidades, os aquíferos pertencentes ao ambiente cristalino são nomeados conforme esse condicionamento geológico e estrutural, em fissurais ou fraturados e, o armazenamento de água é proporcional à densidade dos espaços nas rochas e ao seu grau de interconexão. Estas características definem o denominado Domínio Fissural, segundo a distribuição hidrogeológica do IBGE (2018). Os 20% restantes são ocupados por aquíferos porosos (Figura 3.23), localizados nas planícies litorâneas e bacias sedimentares do estado, no nomeado Domínio Poroso. Esses tipos de

aquíferos são compostos por rochas sedimentares, onde a porosidade geralmente é elevada, resultando, na maioria das vezes, em estruturas muito produtivas (MARTINS *et al*, 2006).



Legenda: Abrangência dos tipos de Domínios existentes no estado do Rio de Janeiro. Os polígonos em preto indicam os municípios da área de estudo.

Fonte: a autora.

Na área de estudo a hidrogeologia é caracterizada pelo Domínio Fissural, pela existência de fraturas em rochas cristalinas, e presença de cobertura de solo granular decorrente da alteração das rochas, recebendo a denominação de saprólito e, também, por depósitos aluvionares, constituídos de sedimentos aluviais quaternários. O ambiente granular atua como transmissor da água infiltrada na superfície para as camadas subjacentes e estabelece um importante fluxo de recarga ao Domínio Fissural (GONÇALVES; SCUDINO; SOBREIRA, 2005). Em consequência desta dinâmica, nos locais com pacotes sedimentares mais espessos e áreas mais planas haverá mais quantidade de água armazenada. Portanto, nestas áreas há um sistema de dupla porosidade (fissural e granular), proporcionando uma conexão hidráulica.

Nos aquíferos fissurais as propriedades hidrodinâmicas apresentam uma distribuição espacial heterogênea e aleatória, tornando difícil a sua classificação consoante uma

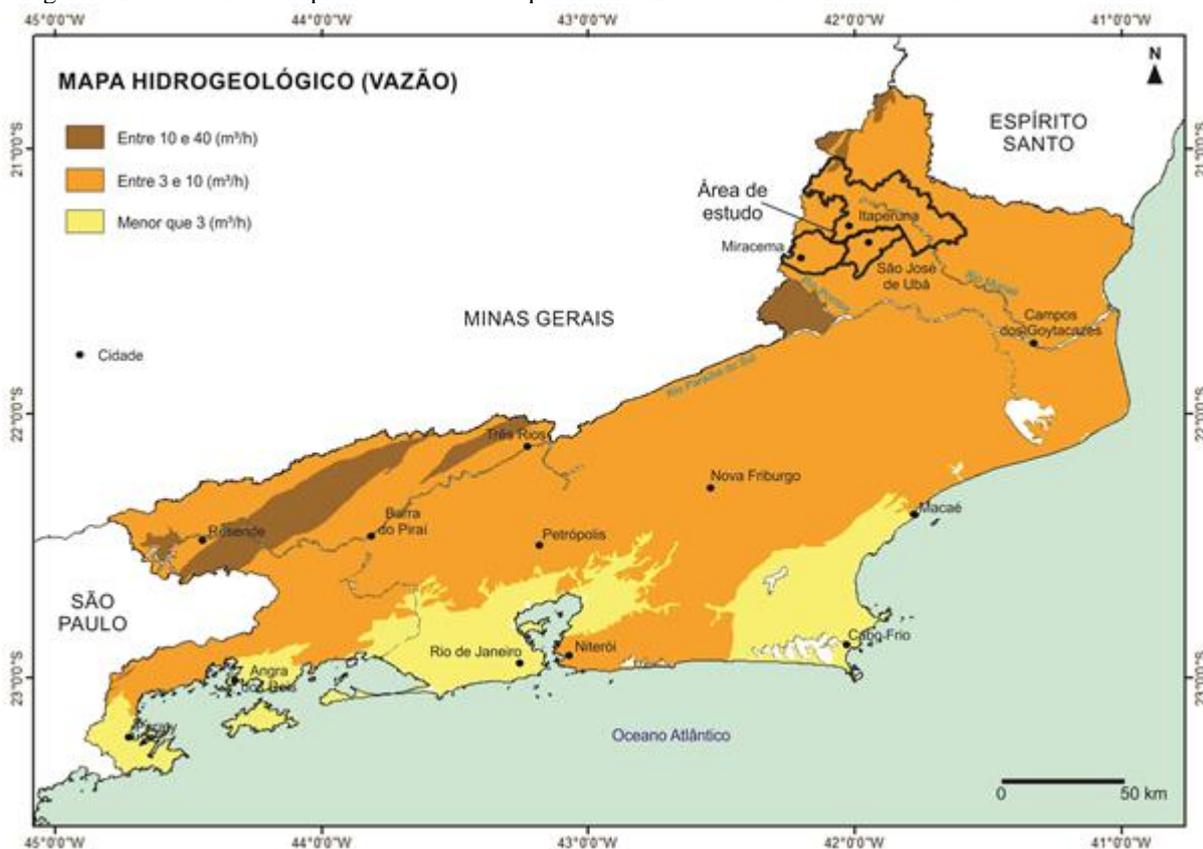
potencialidade hidrogeológica previsível. Estes aspectos contribuem para a inexistência de informações precisas sobre a hidrogeologia de determinadas localidades e impõem limitações aos trabalhos que preconizam inferir a distinção do potencial aquífero de amplas áreas por categorias. Por estes motivos, grande parcela do conhecimento hidrogeológico advém de trabalhos pontuais com inúmeras propostas de classificação.

No município de São José de Ubá (SJU), Ferreira, La Terra e Menezes (2006) individualizaram espacialmente os aquíferos superficial e fissural da Bacia do Barro Branco (porção central do município), com o intuito de ampliar o conhecimento acerca do comportamento hidrogeológico da bacia e otimizar a oferta dos recursos hídricos. Os dados adquiridos com o uso da técnica de Sondagem Elétrica Vertical (SEV) na bacia mostraram uma espessura da cobertura granular variando entre 2 e 12 metros sobrejacente ao reservatório fissural, este com 30 m a 50 m de extensão em superfície e profundidade superior a 30 metros.

Lima *et al.*, (2008) realizaram o monitoramento do aquífero fraturado da bacia do Rio São Domingos, município de São José de Ubá-RJ, por meio de análises de dados de poços. O limite da bacia abrange todo o município de SJU e 10% de sua extensão está localizada no município de Itaperuna-RJ. Os resultados dos ensaios demonstraram elevados níveis de transmissividade ( $4,44 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$  e  $1,728 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ ) e coeficiente de armazenamento ( $2,486 \times 10^{-4}$  e  $1,073 \times 10^{-4}$ ), respectivamente nas Vilas de Cambiocó-RJ e Santa Maria-RJ, ambas em SJU. Segundo os autores, as vazões médias obtidas nos poços foram, na mesma ordem, de  $17,2 \text{ m}^3/\text{h}$  e  $3,21 \text{ m}^3/\text{h}$ , revelando uma boa taxa de oferta hídrica.

Na área de estudo, as vazões hidrogeológicas médias, de acordo com dados do IBGE (2018) (Figura 3.24) variam entre 3 e  $10 \text{ m}^3/\text{h}$ . Contudo, esses valores são variáveis de acordo com as características intrínsecas de cada local.

Figura 3.24 – Potencial de produtividade dos aquíferos no Estado do Rio de Janeiro e área de estudo indicada.



Legenda: Intervalos de vazão hidrogeológica no estado do Rio de Janeiro. Os polígonos em preto indicam os municípios da área de estudo.

Fonte: a autora.

A análise prévia da disponibilidade hídrica subterrânea de aquíferos em Domínio Fissural deve ser executada com base na contribuição do aquífero para os rios, ou seja, considerando o escoamento de base dos canais. O volume disponível localiza-se entre o nível da água do aquífero, a partir da potenciométrica, e o nível de base da drenagem de uma determinada região (PEREIRA; KILMMELMANN, 2004; SEA, 2014). No entanto, em vista de uma gestão sustentável dos recursos hídricos subterrâneos torna-se premente impor restrições aos volumes retirados, como medida preventiva para evitar exaurir os aquíferos devido à superexploração.

### 3.3.9. Poços cadastrados no SIAGAS

O Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) compõe uma base nacional de dados de poços, principalmente tubulares, atualizado de maneira contínua pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM), permitindo uma gestão da informação hidrogeológica e a sua integração com outros bancos de dados. Os poços cadastrados na região de estudo

constam no Anexo I e a sua distribuição espacial está ilustrada no Anexo II. No município de Miracema-RJ há o registro de 13 poços tubulares, na devida ordem: 1 na área de estudo de Areias; em São José de Ubá-RJ, 07 poços, onde 2 estão localizados nas áreas de estudo do Campo do Grêmio e Santa Maria; e, no município de Itaperuna-RJ, 49 poços tubulares. No entanto, no sudoeste de Itaperuna, onde foram realizadas as atividades deste trabalho, não existem poços com cadastro no SIAGAS.

As informações sobre os poços são usadas em ações de integração de políticas públicas, em especial nas regiões que sofrem com a escassez de água. Os dados cadastrados contribuem para o estabelecimento de planos de ações com vistas ao aumento da oferta hídrica. Por estes motivos, o registro do posicionamento geográfico dos poços não cadastrados no SIAGAS realizado durante as campanhas desta pesquisa será fornecido às prefeituras dos respectivos municípios para auxiliar na gestão dos recursos hídricos. A administração pública, ciente da localização desses poços, poderá ter a possibilidade de estabelecer protocolos e canais de orientação aos usuários sobre os procedimentos a serem cumpridos na manutenção e preservação da água em subsuperfície.

#### 3.4. Métodos geofísicos aplicados na área de estudo para a identificação de assinaturas e padrões geofísicos

As aquisições pelos métodos elétrico, magnético e eletromagnético (subcapítulos 3.4.1., 3.4.2. e 3.4.3.) compreenderam localidades dos municípios fluminenses de São José de Ubá, Miracema e Itaperuna, indicadas na Tabela 3.5. Visando à identificação de padrões das assinaturas geofísicas e a calibração dos resultados foram inicialmente realizadas aquisições em locais onde há poço cadastrado no sistema SIAGAS. A partir dos valores obtidos e das assinaturas nos perfis foram aplicados os métodos geofísicos em localidades sem a presença de poços cadastrados.

Tabela 3.5 – Áreas de estudo e existência de poço cadastrado no SIAGAS.

Município	Local	Poço (SIAGAS)	Coordenadas	
			X	Y
São José de Ubá	Campo do Grêmio	Sim	194.693*	7.635.183
São José de Ubá	Santa Maria	Sim	198.800*	7.632.415
São José de Ubá	Sítio São Domingos	Não	--	--
Miracema	Areias	Sim	799.758**	7.630.325
Miracema	Fazenda Montinéia	Não	--	--
Itaperuna	Itajara	Não	--	--

Legenda: Coordenadas no Datum SIRGAS2000. (\*) Fuso 24; (\*\*) Fuso 23.

Fonte: a autora.

### 3.4.1. Eletroresistividade

O levantamento foi realizado com o equipamento *Syscal Kid Switch*, da empresa *Iris instruments*. Na técnica utilizada do caminhamento elétrico aplicou-se o arranjo dipolo-dipolo. A configuração em cada linha de aquisição compreendeu o uso de 24 eletrodos, com 5 metros de espaçamento entre eles e nove níveis de investigação. A aquisição inicial pelo equipamento obteve 120 m de extensão em superfície (Figura 3.25). Nos locais onde as linhas do perfil ultrapassaram 120 m procedeu-se a utilização da configuração “roll along” do equipamento, adicionando 60 m na superfície a cada novo trecho adquirido. Os dados foram processados nos *softwares* Prosys II (*Iris instruments*, v 3.7) e Res2DInv (*Geotomo*, v 4.07).

Figura 3.25 – Levantamento de dados na fazenda Montinéia, município de Miracema, pelo método elétrico com o equipamento *Syscal Kid Switch*.



Legenda: A) Equipamento *Syscal Kid* em aquisição pelo método elétrico, por meio da técnica do caminhamento elétrico. B) Detalhe do módulo de aquisição do eletroresistivímetro *Syscal Kid*. C) Cabo de conexão entre o módulo e os eletrodos para a injeção de corrente em subsuperfície.

Fonte: a autora.

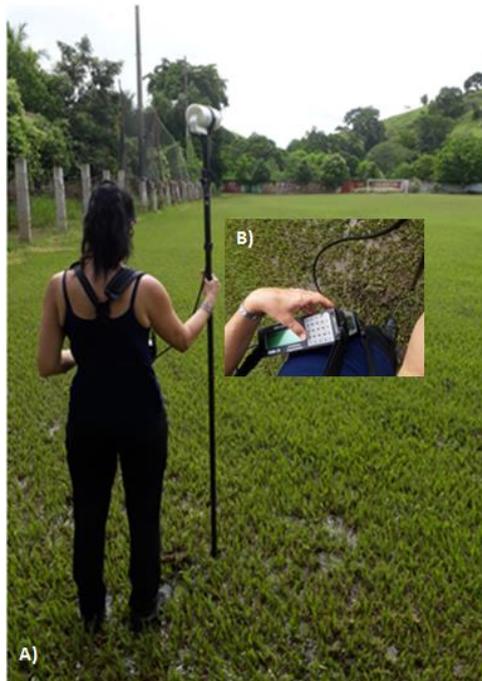
No processamento de dados obtidos pelo Syscal Kid foram selecionadas as rotinas de inversão do *software*, a fim de realizar a interpolação entre os valores calculados, que apresentaram erros RMS (*root mean squared*) mais baixos em revisão às informações obtidas. Um baixo valor de RMS significa mais concordância entre os valores calculados pelo *software* e os medidos em campo. As rotinas escolhidas foram: Robusta; Logarítmica e Jacobiana.

Os dados de topografia foram incorporados aos perfis, a partir de aquisições pelo equipamento GPS modelo map60-CSx da empresa Garmin. Este procedimento é realizado para a obtenção de resultados mais aproximados do modelo real em subsuperfície, e evidenciar as tendências de direção do fluxo ou acúmulo de água.

#### 3.4.2. Magnetometria

A pesquisa pelo método magnético ocorreu com o uso do equipamento da empresa GEM, modelo GSM-19 (Figura 3.26). Nas linhas investigadas, a extensão e os pontos amostrados consistem dos mesmos pontos utilizados no método elétrico (espaçamento de 5 m entre os pontos). Em áreas onde foram realizadas malhas regulares, obedeceu-se ao espaçamento de 10 m entre cada ponto, em todas as direções.

Figura 3.26 – Aquisição geofísica pelo método magnético no Campo do Grêmio, município de São José de Ubá - RJ.



Legenda: A) Levantamento de dados magnéticos e B) Detalhe do magnetômetro GEM GSM-19.

Fonte: a autora.

Na correção da variação diurna nos dados obtidos utilizou-se o *software GemLink*, v 5.4. Posteriormente, as informações de campo foram tabeladas e inseridas as respectivas coordenadas geográficas. Esses dados foram importados para o *software Geosoft Oasis Montaj*, v 6.4.2, onde se processaram os perfis magnéticos e os mapas da topografia do embasamento. No processamento foram produzidos mapas de Campo Magnético Total e da Amplitude do Sinal Analítico, além de se determinar as profundidades do embasamento com o protocolo da Deconvolução de Euler.

### 3.4.3. Eletromagnético a partir da técnica Ground Penetrating Radar – GPR

Na obtenção dos dados eletromagnéticos foi usado o equipamento Mala, modelo ProEx e antenas de 50MHz e 100MHz (Figura 3.27). A extensão e os pontos amostrados foram os mesmos dos perfis dos métodos elétrico e magnético. Na aquisição utilizou-se o *software Groundvision*, v 2.1.0.0 e, no processamento das seções (radargramas), o programa *Reflex2DQuick*, v 1.0.0.0.

Figura 3.27 – Utilização do método eletromagnético no Campo do Grêmio, São José de Ubá - RJ.



Legenda: Uso da técnica *Ground Penetrating Radar* (GPR) com o equipamento Mala, modelo ProEx, com as antenas de 50 MHz (A) e 100 MHz (B).

Fonte: a autora.

Durante o processamento dos dados foi inserida a topografia das áreas e aplicados filtros, para melhorar a razão sinal/ruído. O filtro *Subtract-DC-shift* possibilitou a remoção de ruídos relacionados às propriedades elétricas do subsolo e da distância entre o transmissor e o receptor. A aplicação da correção estática excluiu dados espúrios ocasionados pela chegada da onda direta da fonte ao receptor. A correção dos fenômenos de indução, oriundos das componentes de baixa frequência do sinal foi feita aplicando-se o filtro “*dewow*”. No decaimento exponencial do sinal ao atravessar o solo, o procedimento executado para compensação de perda de informações foi aplicar ganhos (*Gain Function*) durante o processamento para amplificação do sinal. O *Bandpass butterworth* foi usado para suprimir ruídos que diferiam no conteúdo de frequência do sinal. O filtro *Background Removal* foi utilizado com o intuito de remover ou atenuar o ruído de fundo e o efeito de reverberações das antenas. Quando necessário, aplicou-se o *Running Average* para enfatizar as informações horizontais. Em alguns casos, foi usada a migração (*fk Migration*) para melhorar a resolução da seção e posicionar corretamente os refletores, tornando os elementos dos alvos espacialmente mais precisos.

A aplicação de equipamentos geofísicos objetivou identificar padrões de assinaturas relativos à presença de água subterrânea, de estruturas geológicas (falhas, fraturas e diferentes litotipos), a topografia do embasamento, porosidades diferentes no substrato, indicando a localização e profundidade. A integração das informações geofísicas de diferentes métodos (elétrico, magnético e eletromagnético) permitiu sinalizar, espacialmente, o local de armazenamento da água bem como a espessura da camada permeável e a geometria dos substratos.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da pesquisa, em função das etapas detalhadas na metodologia tem como base de integração a caracterização ambiental da área de estudo, a partir das informações geofísicas, associadas ao clima, morfologia, vegetação, solos, hidrografia, hidrogeologia, uso e ocupação do solo. Todos esses dados obtidos foram conjugados, de forma generalizada e não específica aos mapas geológicos (tipos de rochas e estruturas) da área de estudo.

Os locais investigados na pesquisa de campo correspondem à:

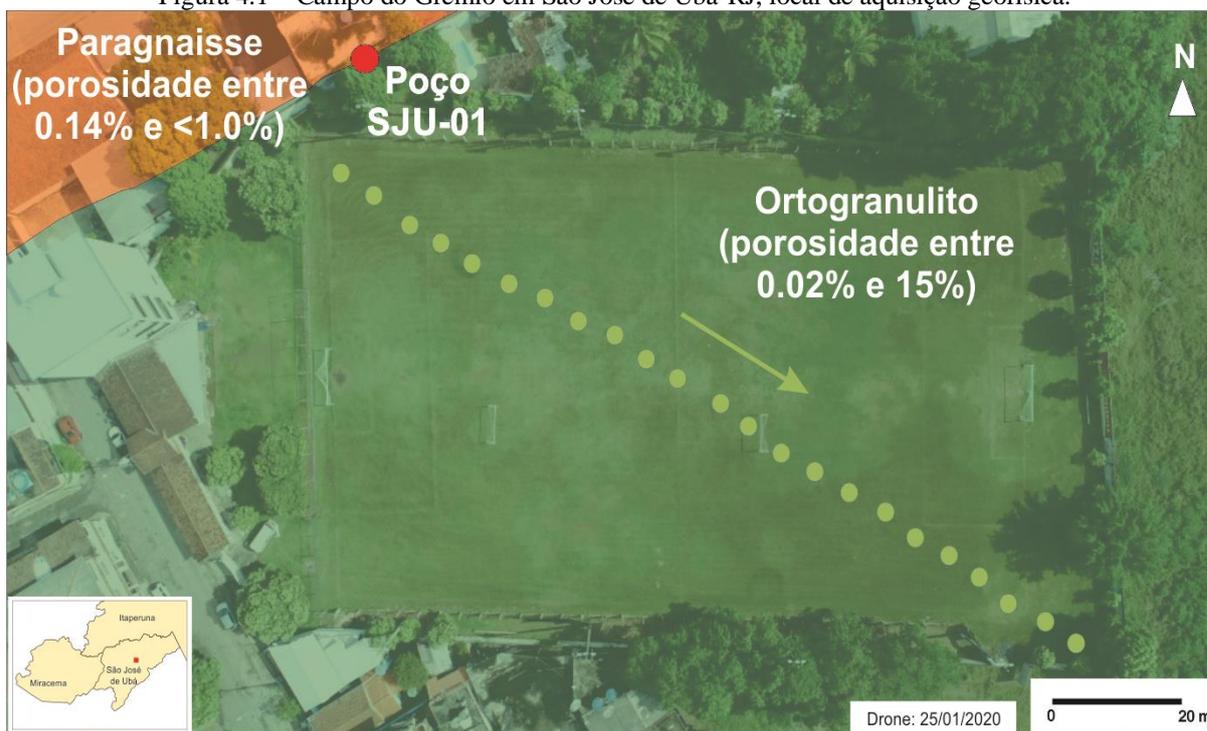
- São José de Ubá: Campo do Grêmio (situado no distrito sede), Vila de Santa Maria (área rural) e Sítio São Domingos (área rural);
- Miracema: distrito de Areias (área rural) e Fazenda Montinéia (área rural) e
- Itaperuna: distrito de Itajara, sudoeste do município (área rural).

### 4.1. São José de Ubá-RJ

#### 4.1.1 Campo do Grêmio (distrito sede)

A Figura 4.1 mostra a imagem de um campo de futebol, o Campo do Grêmio, em São José de Ubá-RJ, onde o poço (SJU-01) está situado neste terreno, embaixo de uma construção. A linha pontilhada mostra a extensão da aquisição do perfil geofísico e a seta indica a direção. O mapa geológico de Heilbron *et. al.*, (2016) da Figura 4.1 mostra o contato entre dois tipos de rocha, o paragnaisse (realce cor laranja na figura) e o ortogranulito (realce cor verde na figura), ambos com porosidades diferentes. Devido ao ortogranulito ser um pouco mais poroso, a rocha é capaz de armazenar mais quantidade de água em seus interstícios do que o paragnaisse.

Figura 4.1 – Campo do Grêmio em São José de Ubá-RJ, local de aquisição geofísica.



Legenda: Seção geofísica (linha pontilhada em amarelo); poço (ponto vermelho); seta (direção da aquisição) e indicativo dos litotipos presentes na região, sobre imagem produzida por drone.

Fonte: a autora.

As aquisições geofísicas pelos métodos elétrico, eletromagnético e magnético foram executadas para produção de perfis 2D da área investigada. No método magnético, além dos perfis 2D (correspondentes à profundidade das rochas e aos seus níveis de susceptibilidade magnética) foi gerado um *grid* de pontos em campo, com o objetivo de mapear a topografia do embasamento rochoso.

O resultado do método elétrico evidencia a presença de fratura no ortogramulito, também identificada no perfil eletromagnético. Esta estrutura ressalta a potencialidade em transmitir (transmissividade) e armazenar água. Os baixos valores de resistividade ( $< 20$  Ohm.m) sinalizam concentração de água. Também foi identificado um substrato poroso com umidade, correspondente a uma água residente por um período transitório, cuja maior parcela desloca-se lateralmente, movendo-se para as porções mais profundas (Figura 4.2A).

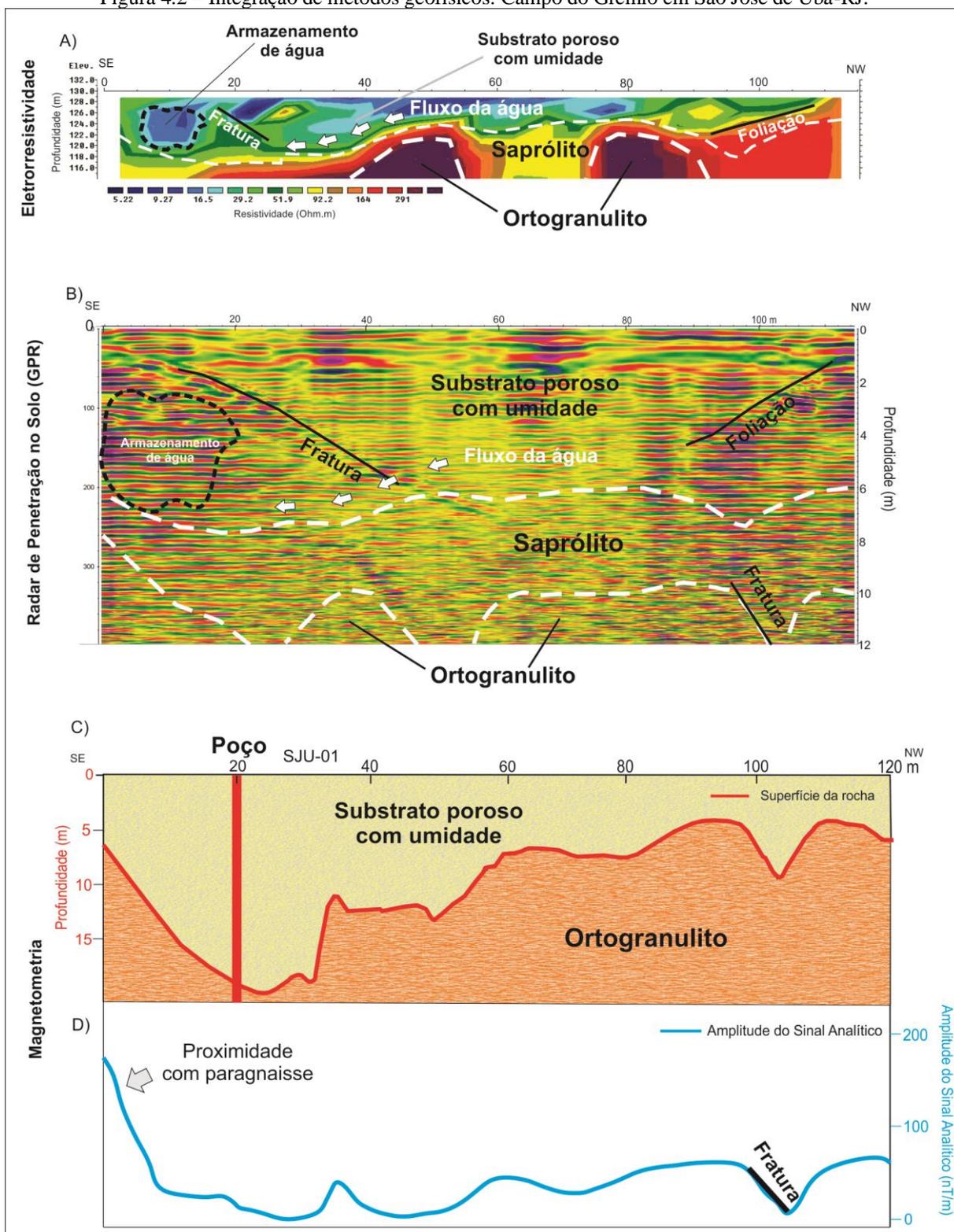
No método eletromagnético (Figura 4.2B), contrastes de condutividade elétrica e de permissividade dielétrica nas interfaces do subsolo definiram zonas com a presença de material com baixa resistividade ou material condutivo. Neste caso, a água encontra-se em contraste com outros elementos em subsuperfície, como solo, rocha, fratura, etc. Tanto os

níveis mais condutivos do método elétrico como as reverberações do GPR (eletromagnético) mostram o delineamento de volume de água subterrânea.

No processamento dos dados magnéticos foram obtidos dois perfis: profundidade do embasamento (Figura 4.2C) e amplitude do Sinal Analítico (Figura 4.2D). Ambos possibilitaram identificar assinaturas correspondentes à proximidade da zona de contato de rochas com diferentes propriedades magnéticas (ortogranulito e paragnaisse).

O poço existente no terreno foi projetado no perfil geofísico da profundidade do embasamento (Figura 4.2C), ressaltando a presença de condições apropriadas ao armazenamento de água no local, pois o embasamento (ortogranulito) encontra-se a uma profundidade aproximada de 18 metros, sob um substrato poroso com a presença de água. O perfil do Sinal Analítico (Figura 4.2D) indica a existência de fratura no ortogranulito, que modela a sua superfície.

Figura 4.2 – Integração de métodos geofísicos: Campo do Grêmio em São José de Ubá-RJ.



Legenda: (A) perfil de eletrorresistividade; (B) perfil do método eletromagnético (GPR); (C) topografia do embasamento; (D) Amplitude do Sinal Analítico.

Fonte: a autora.

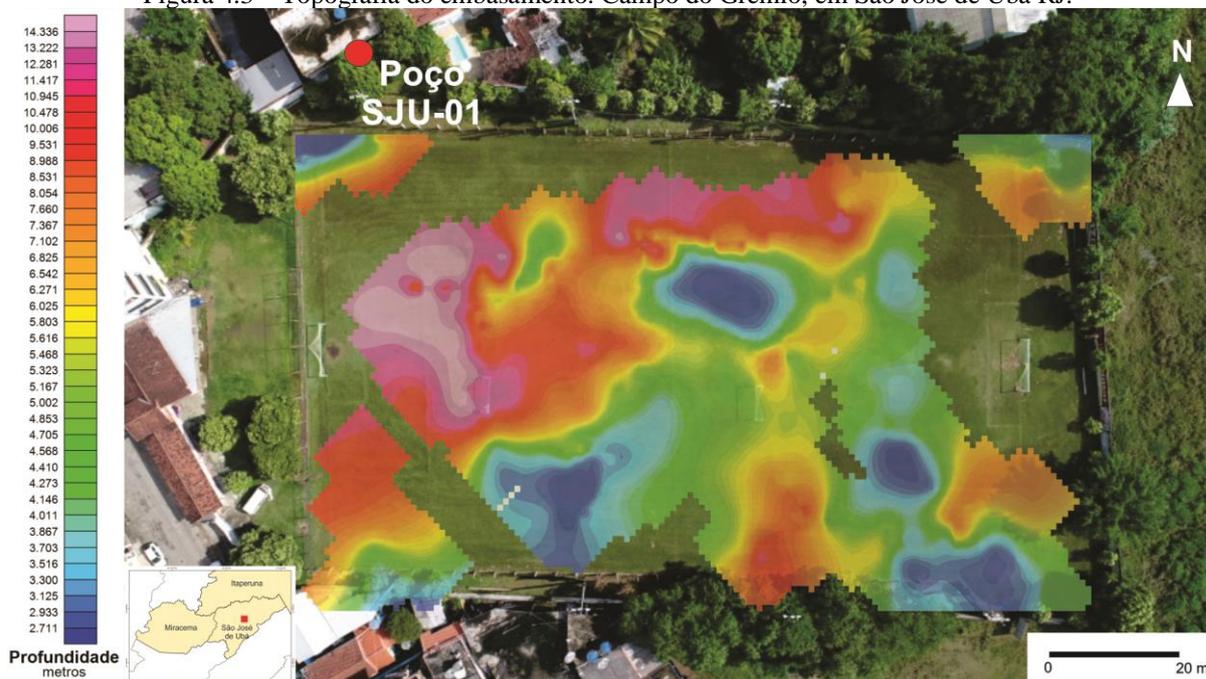
Aquisição  
geofísica:  
11/07/2019

Aquisição  
geofísica:  
25/01/2020

Aquisição  
geofísica:  
11/07/2019

A aquisição geofísica pelo método magnético permitiu, por meio de uma malha de pontos, elaborar o mapa da topografia do embasamento (Figura 4.3). Este mapa mostra o poço localizado em uma área em que a topografia favorece ao acúmulo de água devido à profundidade mais elevada neste local. De acordo com o gradiente de cores dessa escala, os tons azuis e verdes representam as áreas onde o embasamento está aproximadamente entre 3 e 5 m da superfície do terreno e os tons avermelhados correspondem às áreas mais profundas, entre 8 e 15 m.

Figura 4.3 – Topografia do embasamento: Campo do Grêmio, em São José de Ubá RJ.



Legenda: Ponto vermelho na figura: poço SJU-01, sobre imagem produzida por drone.  
Fonte: a autora.

O poço está situado em uma área plana, urbanizada e com fragmentos de vegetação. Na direção leste, a região possui áreas mais elevadas e remanescentes de Mata Atlântica, contribuindo para a infiltração da água no solo. O corpo hídrico mais próximo, denominado de Córrego Inveja, fica nesta área em que há resquícios de vegetação, distante 45 m do início da seção geofísica (Figura 4.4). A baixa declividade, o solo arenoso, as fraturas, a direção dos fluxos condicionada pela foliação da rocha, a zona de contato entre o paragnaisse e o ortogranulito e a superfície permeável do campo (grama) são os fatores mais importantes para a recarga do aquífero. A homogeneidade da textura arenosa do solo favorece a infiltração de água no terreno e o armazenamento de água e recarga do poço.

Figura 4.4 – Localização do Córrego Inveja, próximo à aquisição geofísica no campo do Grêmio.



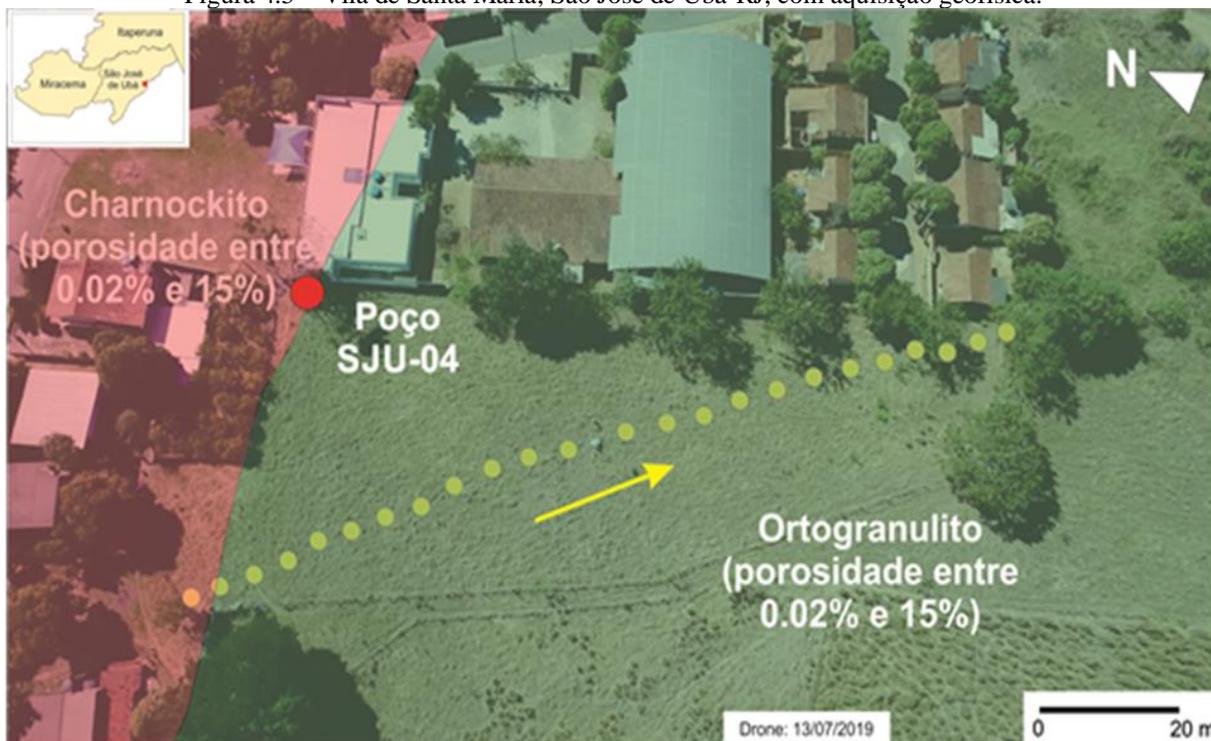
Legenda: Seção geofísica (linha pontilhada em amarelo) e Córrego Inveja, sobre imagem produzida por drone. A seta branca indica o sentido do escoamento.

Fonte: a autora.

#### 4.1.2. Vilarejo de Santa Maria, área rural, em São José de Ubá-RJ

No Vilarejo de Santa Maria (Figura 4.5) há um poço (SJU-04) localizado no contato entre duas rochas diferentes, o charnockito (realce em rosa na figura) e o ortogranulito (realce em verde na figura). Contudo, de acordo com o mapa geológico de Heilbron *et. al* (2016), as duas litologias possuem valores de porosidade semelhantes.

Figura 4.5 – Vila de Santa Maria, São José de Ubá-RJ, com aquisição geofísica.



Legenda: Seção geofísica (linha pontilhada em amarelo); poço (ponto vermelho); seta (direção da aquisição) e indicativo dos litotipos presentes na região, sobre imagem produzida por drone.

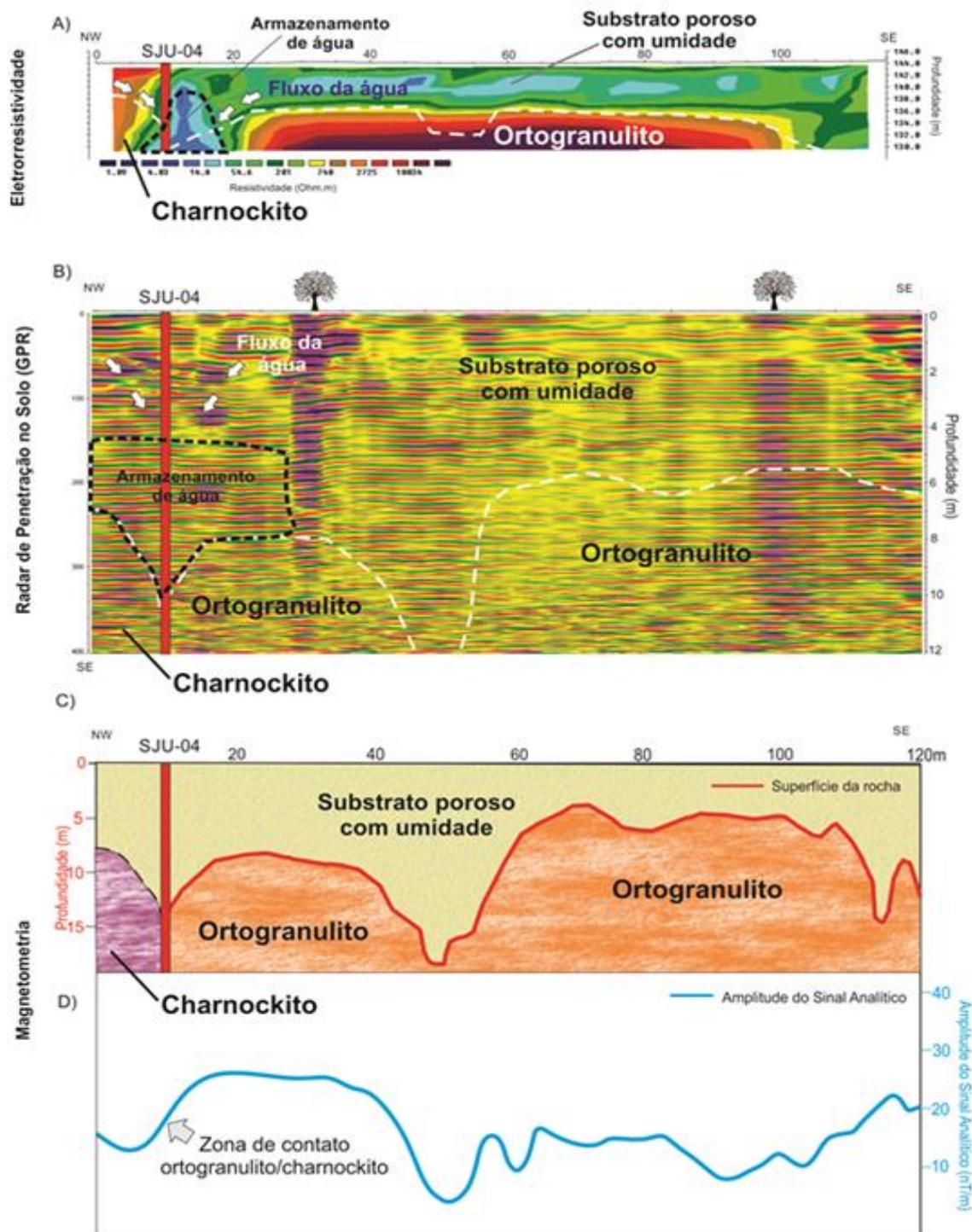
Fonte: a autora.

O potencial de armazenamento de água na região é evidenciado nos perfis de eletrorresistividade (Figura 4.6A) e eletromagnético (Figura 4.6B), onde as zonas condutivas relativas à presença de água estão bem marcadas, e coincide com a localização do poço artesiano. No perfil de eletrorresistividade os valores inferiores a 20 ohm.m indicam alta condutividade em função do acúmulo de água. Observa-se uma direção do fluxo subsuperficial (de SE para NW), responsável pela recarga do aquífero.

No perfil eletromagnético (GPR) a anomalia associada a presença de água atinge até cerca de 7 metros, situada nas proximidades do poço SJU-04. O embasamento está a aproximadamente 7 metros da superfície, coberto por um substrato poroso com umidade, que atua como uma zona de recarga para o poço.

Os dados magnéticos, por meio da elaboração de uma malha de pontos, contribuíram para identificar a topografia do embasamento (Figura 4.6C) e a zona de contato entre as duas rochas (Figura 4.6D), onde as águas em subsuperfície tendem a se acumular.

Figura 4.6 – Integração de métodos geofísicos realizado na Vila de Santa Maria, em São José de Ubá-RJ.



Aquisição  
geofísica:  
13/07/2019

Aquisição  
geofísica:  
25/01/2020

Aquisição  
geofísica:  
13/07/2019

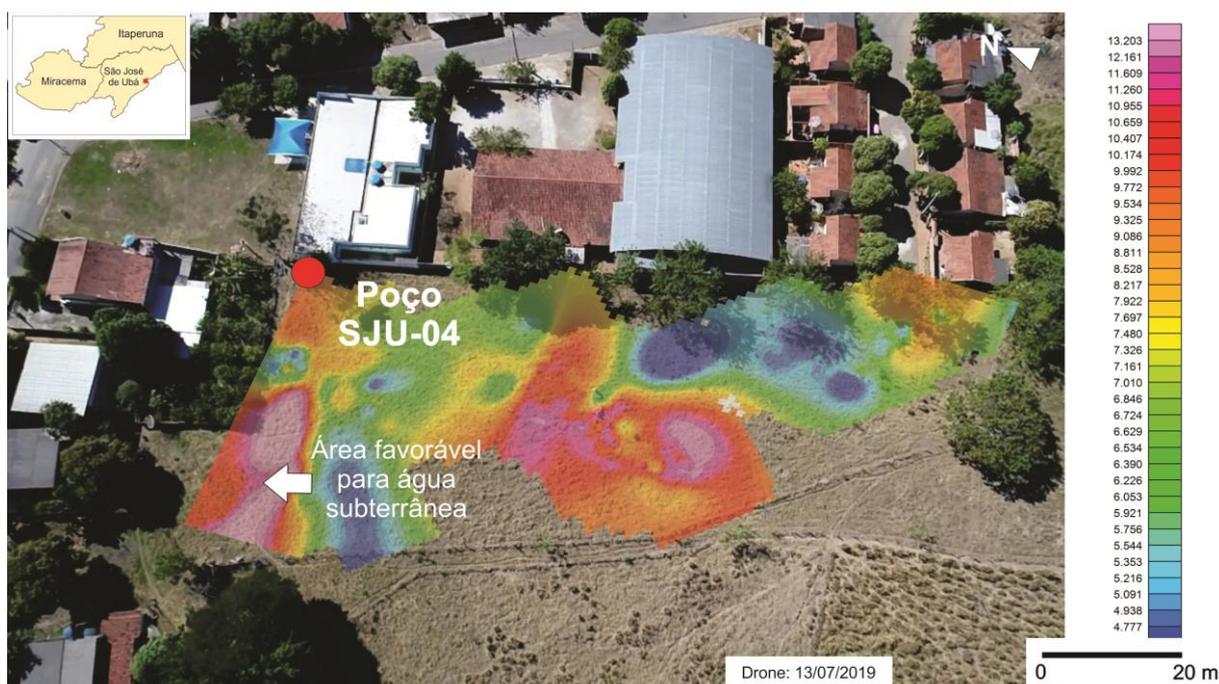
Legenda: (A) perfil de eletrorresistividade; (B) perfil do método eletromagnético (GPR); (C) topografia do embasamento; (D) Amplitude do Sinal Analítico.

Fonte: a autora.

Segundo o mapa da topografia do embasamento (Figura 4.7), as partes mais profundas, com aproximadamente 15 metros, estão próximas ao contato entre as rochas. A integração das informações indicam que o poço SJU-04 está localizado em níveis propícios à

ocorrência de reservatórios de água, em função da profundidade do embasamento e do contato entre as rochas, atuando como zona de recarga deste poço. No entanto, como sinalizado na Figura 4.7, há um outro local favorável ao acúmulo de água subterrânea, situado no contato entre as duas rochas e com topografia do embasamento em nível mais profundo.

Figura 4.7 – Topografia do embasamento na Vila de Santa Maria, em São José de Ubá-RJ.



Legenda: Poço (ponto vermelho) e mapa de profundidade do embasamento, sobre imagem produzida por drone.

A seta branca indica local favorável para a presença de água subterrânea.

Fonte: a autora.

O local da aquisição geofísica situa-se no fundo do vale, onde as águas para a recarga do aquífero advém preferencialmente da direção SE. A cerca de 140 metros de distância da seção geofísica há um córrego sem nome (Figura 4.8). A área adjacente ao perfil e à drenagem é mais elevada e, em seu topo, existe vegetação que favorece a entrada de água no solo. Predominam gleissolos desenvolvidos a partir de sedimentos não consolidados, com composição argilo-arenosa em área de topografia plana, o que contribui para a água se estagnar internamente. Estes aspectos consolidam os resultados dos níveis condutivos nos perfis de eletrorresistividade e GPR e a tendência do fluxo de água para a direção NW/W, onde verifica-se melhor potencial reservatório em função da topografia do embasamento.

Figura 4.8 – Localização da seção geofísica e do córrego sem nome na Vila de Santa Maria, em São José de Ubá-RJ.



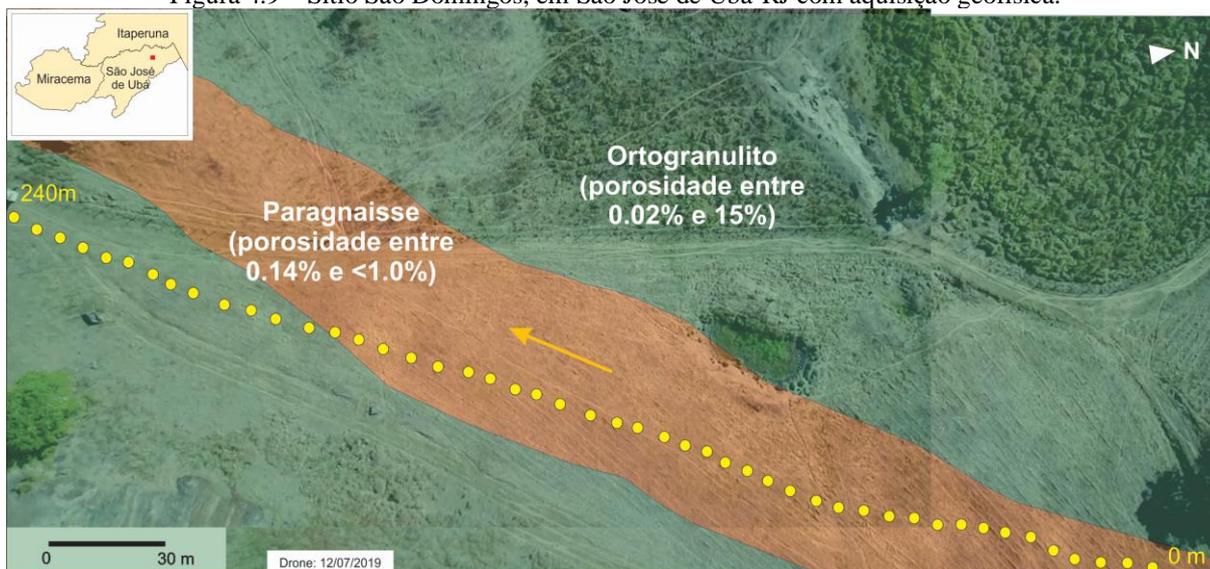
Legenda: Seção geofísica (linha pontilhada em amarelo) e córrego sem nome, sobre imagem produzida por drone. A seta azul indica o sentido do escoamento.

Fonte: a autora.

#### 4.1.3. Sítio São Domingos em São José de Ubá-RJ

A localidade onde está situado o sítio São Domingos não tem poço cadastrado no SIAGAS, somente uma cacimba escavada para a dessedentação de animais, indicando que a água está contida bem próxima à superfície (Figura 4.9). No mapa geológico de Heilbron *et. al* (2016), há intercalação entre o paragnaisse (realce laranja na figura) e o ortogranulito (realce em verde na figura).

Figura 4.9 – Sítio São Domingos, em São José de Ubá-RJ com aquisição geofísica.



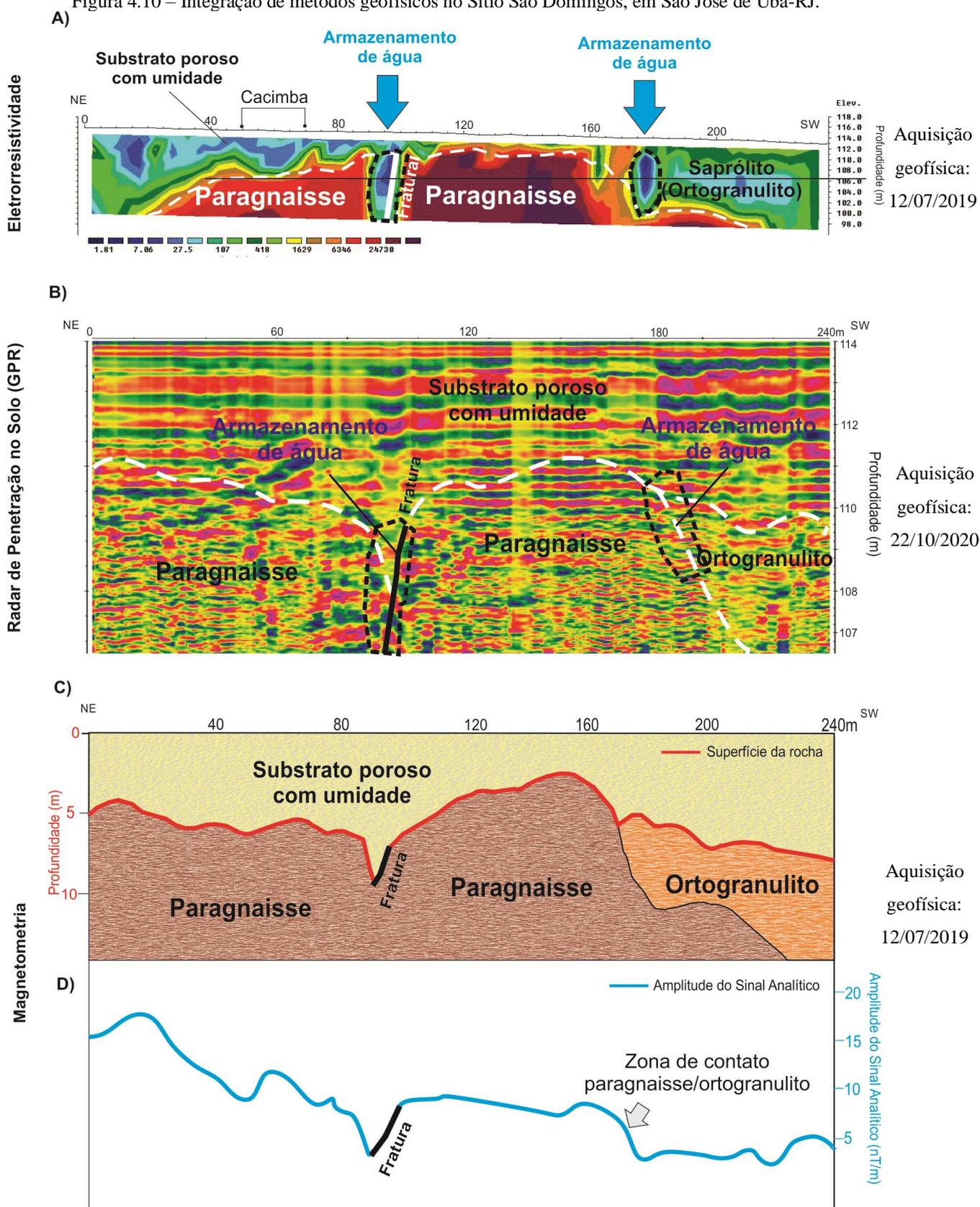
Legenda: Seção geofísica (linha pontilhada em amarelo); seta (direção da aquisição) e indicativo dos litotipos presentes na região, sobre imagem produzida por drone.

Fonte: a autora.

Os perfis de eletrorresistividade, eletromagnético (GPR) e magnetometria exibem duas áreas com grande potencial para a captação de água. A eletrorresistividade (Figura 4.10A) e o GPR (Figura 4.10B) indicam a presença de fratura no paragnaisse, contribuindo para o armazenamento de água a profundidades superiores a 10 metros. Os mesmos perfis mostram que a cacimba recebe o aporte de um fluxo de água raso (< 3 metros), armazenado no substrato poroso.

O perfil magnético do topo do embasamento (Figura 4.10C) também exibe a assinatura correspondente à fratura, assim como o perfil do Sinal Analítico (Figura 4.10D). As respostas magnéticas das rochas refletem suas propriedades magnéticas distintas. Os valores médios obtidos para a susceptibilidade magnética de  $10.2 \times 10^{-6}$  no ortogranulito mostram-se superiores aos  $3.24 \times 10^{-6}$  medidos no paragnaisse.

Figura 4.10 – Integração de métodos geofísicos no Sítio São Domingos, em São José de Ubá-RJ.



Legenda: (A) perfil de eletrorresistividade; (B) perfil do método eletromagnético (GPR); (C) topografia do embasamento; (D) Amplitude do Sinal Analítico.

Fonte: a autora.

Em razão da condição topográfica da área pesquisada, situada em fundo de vale, o volume precipitado é propenso a convergir para esse local. Na análise desses resultados são considerados aspectos, como:

- a campanha de eletrorresistividade foi realizada durante o período de estiagem, contudo, as anomalias mostraram dois lugares com assinaturas condutivas correspondentes à presença de água;
- quase a totalidade da região é composta por pasto ou lavouras;
- as drenagens mais próximas estão a cerca de 30 metros da seção; e,
- a vegetação secundária no local é praticamente inexistente.

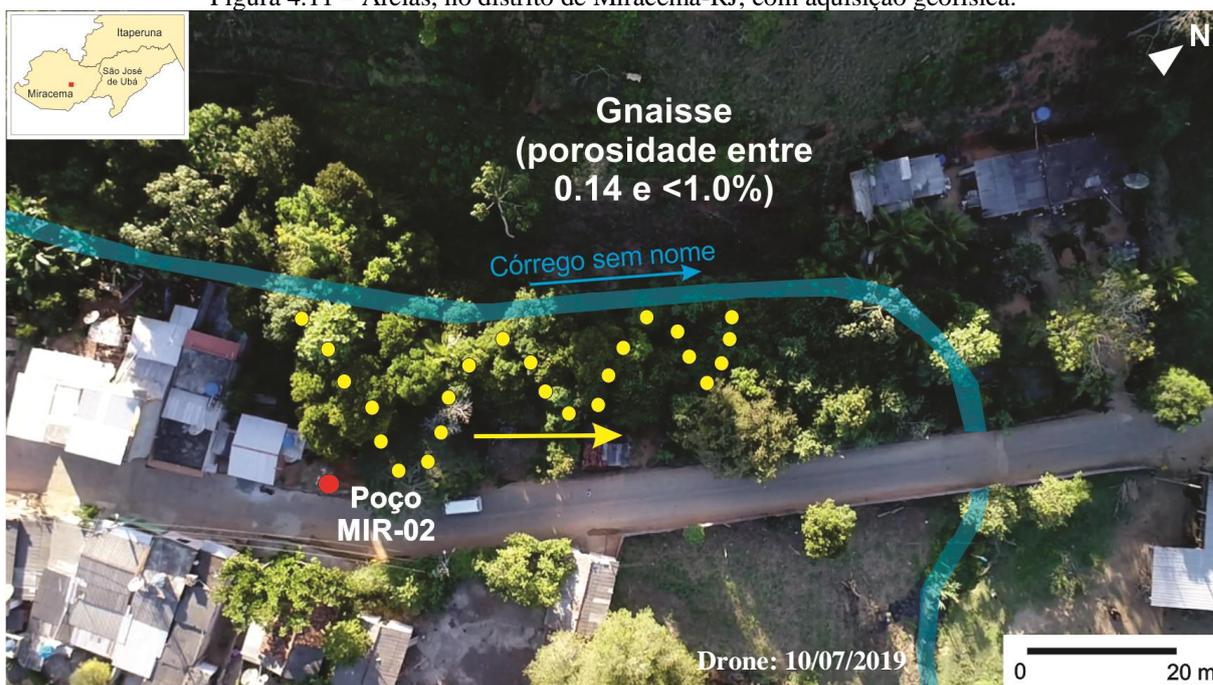
No local prevalece o solo do tipo argissolo vermelho, com textura média/argilosa a argilosa e boa capacidade de retenção de água. Há indícios de interconexão de fraturas e zonas de contato litológico que alimentam os espaços e poros das rochas e os sedimentos do subsolo, tornando a área potencial para a captação de água.

## 4.2. Miracema-RJ

### 4.2.1. Areias, distrito de Miracema-RJ

Neste distrito do município de Miracema há um poço (MIR-02) locado na margem da rua do núcleo urbano e aproximadamente a 15 metros de um córrego sem nome. De acordo com o mapa geológico de Heilbron *et. al* (2016), o poço está instalado no paragnaisse, com porosidade entre 0.14 e < 1.0% (Figura 4.11).

Figura 4.11 – Areias, no distrito de Miracema-RJ, com aquisição geofísica.



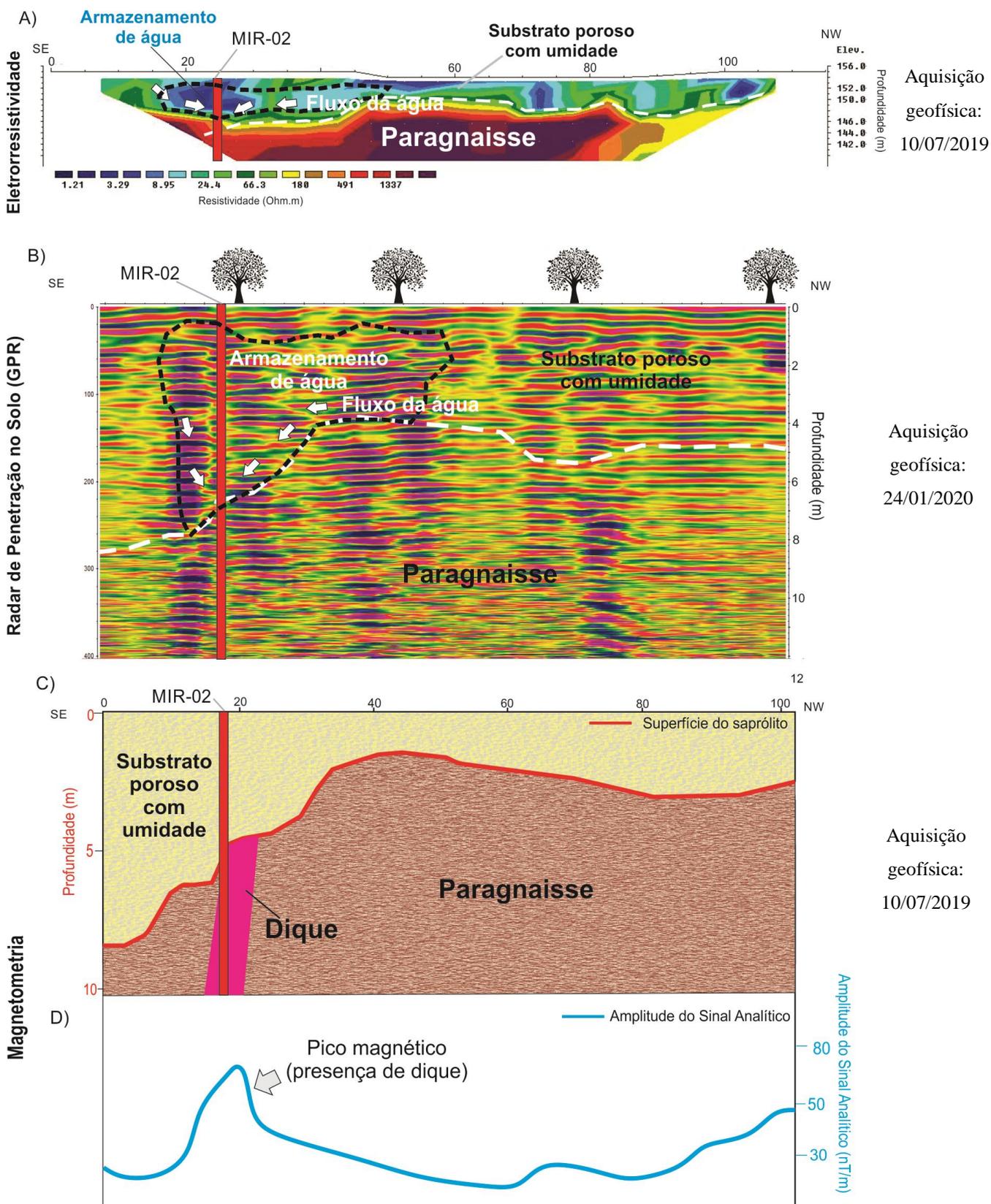
Legenda: Seção geofísica (linha pontilhada em amarelo); poço (ponto vermelho); seta amarela (direção da aquisição). A seta azul indica o sentido do escoamento do córrego. Ao fundo, imagem produzida por drone.  
Fonte: a autora.

O perfil elétrico (Figura 4.12A) mostra o poço situado em região com níveis de resistividade baixos ( $< 20 \text{ Ohm.m}$ ). O fluxo preferencial de água para a recarga do poço ocorre de NW para SE e percola por um substrato poroso com até 7 metros de espessura.

O perfil eletromagnético (GPR) exhibe as anomalias condutivas da presença de água e a conformação da fratura onde o poço está locado (Figura 4.12B).

No perfil 2D da magnetometria da topografia do embasamento (Figura 4.12C) mostra que o poço está instalado a aproximadamente 6 metros da superfície. No perfil da amplitude do Sinal Analítico, o pico observado sugere a presença de um dique intrusivo na fratura do paragneisse, com susceptibilidade magnética superior à rocha encaixante (Figura 4.12D). Estes aspectos geológicos averiguados pela geofísica indicam que a água está armazenada nos espaços entre esses dois tipos de rocha.

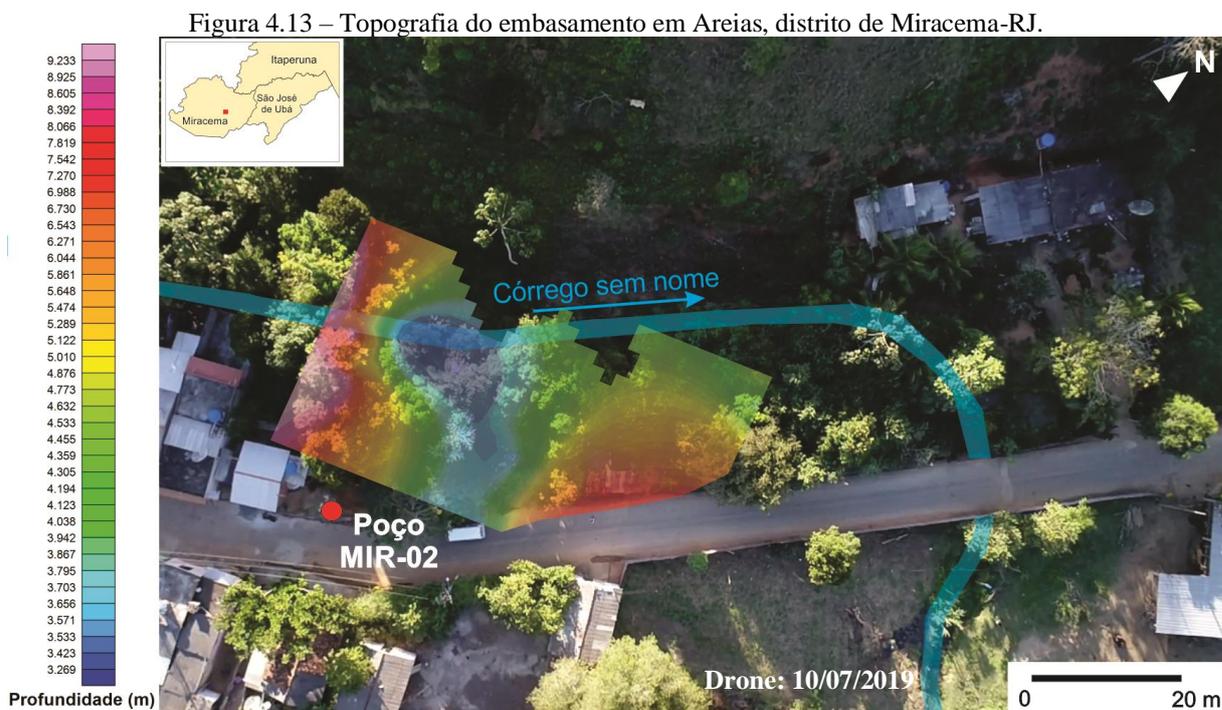
Figura 4.12 – Integração de métodos Geofísicos no distrito de Areias, em Miracema-RJ.



Legenda: (A) perfil eletrorresistividade; (B) perfil do método eletromagnético (GPR); (C) topografia do embasamento; (D) amplitude do sinal analítico.

Fonte: a autora.

O mapa da topografia do embasamento, a partir dos pontos magnéticos obtidos em campo, indica que o poço está locado em uma região onde a rocha apresenta profundidade mais elevada do que a área adjacente, o que favorece o acúmulo/recarga de água (Figura 4.13).



Legenda: Ponto vermelho: poço MIR-02 e mapa da topografia do embasamento, sobre imagem produzida por drone. A seta azul indica o sentido do escoamento do córrego.

Fonte: a autora.

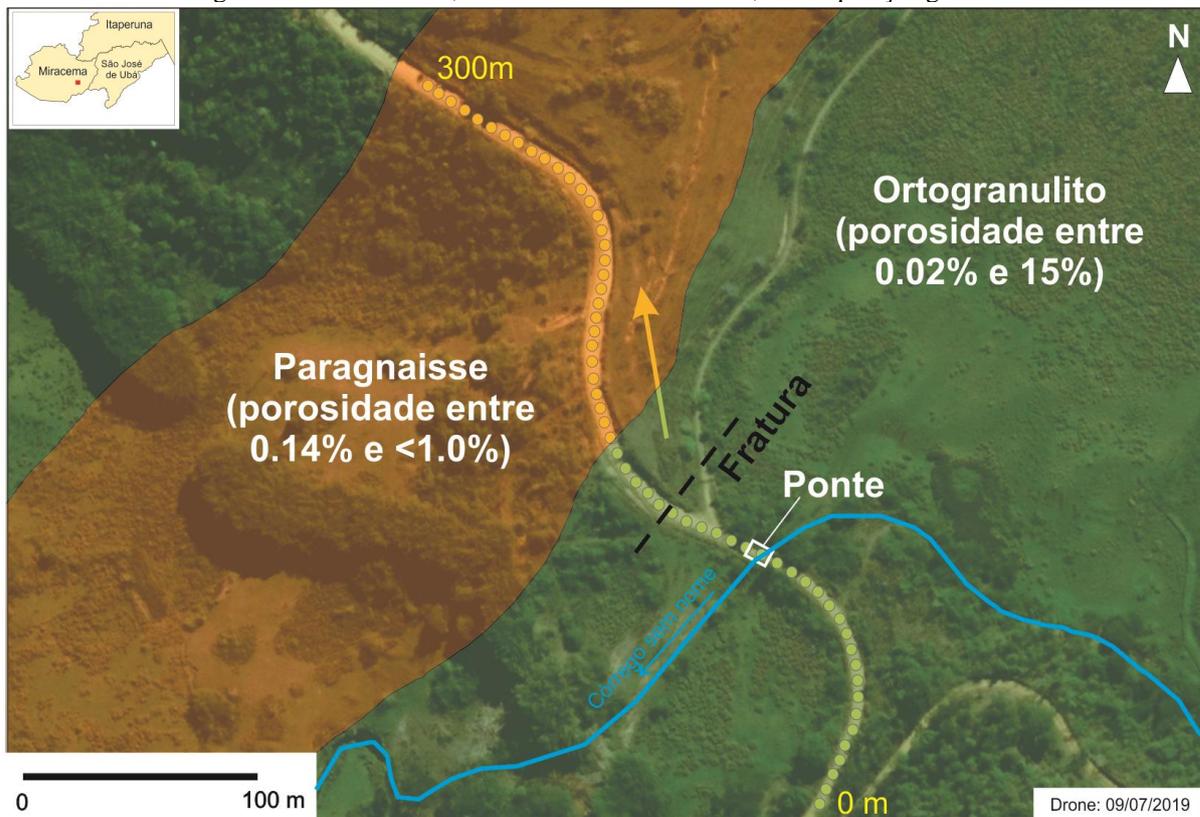
O poço MIR-02 situa-se em região de fundo de vale e as áreas adjacentes possuem isolados fragmentos de vegetação. A maioria dos terrenos do distrito é coberta por lavouras de pastos. Predomina argissolo vermelho-amarelo, com textura variando de arenosa a argilosa no horizonte A e boa capacidade de retenção de água. O volume de chuva que desce o morro e infiltra no solo abastece o córrego e o aquífero, estabelecendo um regime contínuo de vazões aos mananciais.

#### 4.2.2. Montinéia, Miracema-RJ

A região de Montinéia, em Miracema-RJ, foi assim denominada em função da presença da fazenda homônima (Figura 4.14). A geologia local, segundo o mapa de Heilbron *et. al* (2016) é caracterizada por paragnaisse (realce laranja na figura) e o ortogranulito (realce verde na figura), com diferentes porosidades. As investigações geofísicas foram realizadas ao

longo da estrada de terra que cruza o contato entre os litotipos. Não há poço cadastrado no SIAGAS no local de aquisição dos dados.

Figura 4.14 – Montinéia, na cidade de Miracema-RJ, com aquisição geofísica.



Legenda: Seção geofísica (linha pontilhada em amarelo); seta (direção da aquisição) e indicativo dos litotipos presentes na região, sobre imagem produzida por drone. A seta azul indica o sentido do escoamento do córrego.  
Fonte: a autora.

As anomalias dos métodos elétrico (Figura 4.15A) e eletromagnético (Figura 4.15B) demonstram evidências da presença de água subterrânea. No perfil elétrico foram identificados dois locais com valores de resistividade inferiores a 100 Ohm.m, porém com níveis pouco mais resistivos do que em outros perfis dos municípios investigados. Um deles relacionado à fratura no ortogranulito e, o segundo, no contato entre os dois litotipos. Ambos os locais alcançam profundidades superiores a 15 metros. Os valores de resistividade distribuídos no perfil indicam a presença de água em menor volume, em função da presença de um substrato menos poroso ou do período mais seco na época da aquisição (julho de 2019), visto que no perfil de GPR, realizado em janeiro de 2020, as reverberações do sinal assinalaram zonas muito condutivas no período de chuvas.

O perfil eletromagnético registra também a fratura no ortogranulito, bem como as interferências causadas por estruturas antrópicas (ponte e piso de concreto na estrada). Em alguns trechos da seção o substrato poroso acima da rocha só alcança espessuras de 10 metros.



Legenda: (A) perfil de eletrorresistividade; (B) perfil do método eletromagnético (GPR); (C) topografia do embasamento; (D) Amplitude do Sinal Analítico.

Fonte: a autora.

A seção geofísica do local pesquisado intercepta um córrego onde está assinalada a ponte no perfil (Figura 4.16).

Figura 4.16 – Localização da seção geofísica e do córrego sem nome em Montinéia, em Miracema-RJ.



Legenda: Seção geofísica (linha pontilhada em amarelo) e córrego sem nome, sobre imagem produzida por drone. A seta azul indica o sentido do escoamento.

Fonte: a autora.

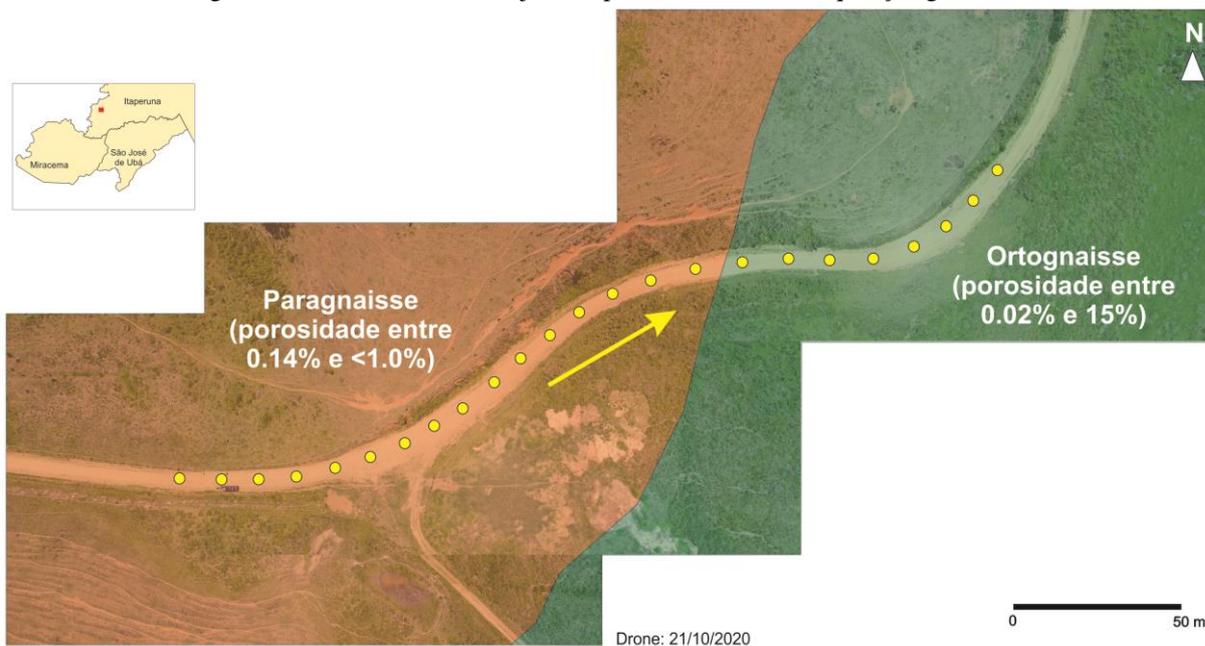
No local predomina o argissolo vermelho-amarelo, com textura média argilosa a argilosa. A presença de fratura no ortogranulito, o contato entre dois litotipos, e uma vegetação relativamente mais abundante do que as áreas circunvizinhas, com capacidade de infiltrar boa parcela da precipitação, conferem potencialidade para a captação de água neste local. Há dois lugares apontados no perfil. No entanto, os mais elevados volumes para a exploração são considerados para a região onde existe a fratura e a topografia é mais suave.

### 4.3. Itaperuna-RJ

#### *4.3.1. Zona rural de Itajara*

A área pesquisada corresponde a um trecho da estrada de acesso ao distrito de Itajara, sudoeste do município de Itaperuna-RJ, e próximo à divisa com o município de Laje do Muriaé-RJ. No local não existe poço cadastrado no SIAGAS (Figura 4.17). De acordo com o mapa de Heilbron *et. al* (2016), a região é geologicamente caracterizada pelas ocorrências de paragnaisse (realce cor laranja) e de ortognaisse (realce cor verde).

Figura 4.17 – Área rural em Itajara, Itaperuna-RJ, local de aquisição geofísica.



Legenda: Seção geofísica (linha pontilhada em amarelo); seta (direção da aquisição) e indicativo dos litotipos presentes na região, sobre imagem produzida por drone.

Fonte: a autora.

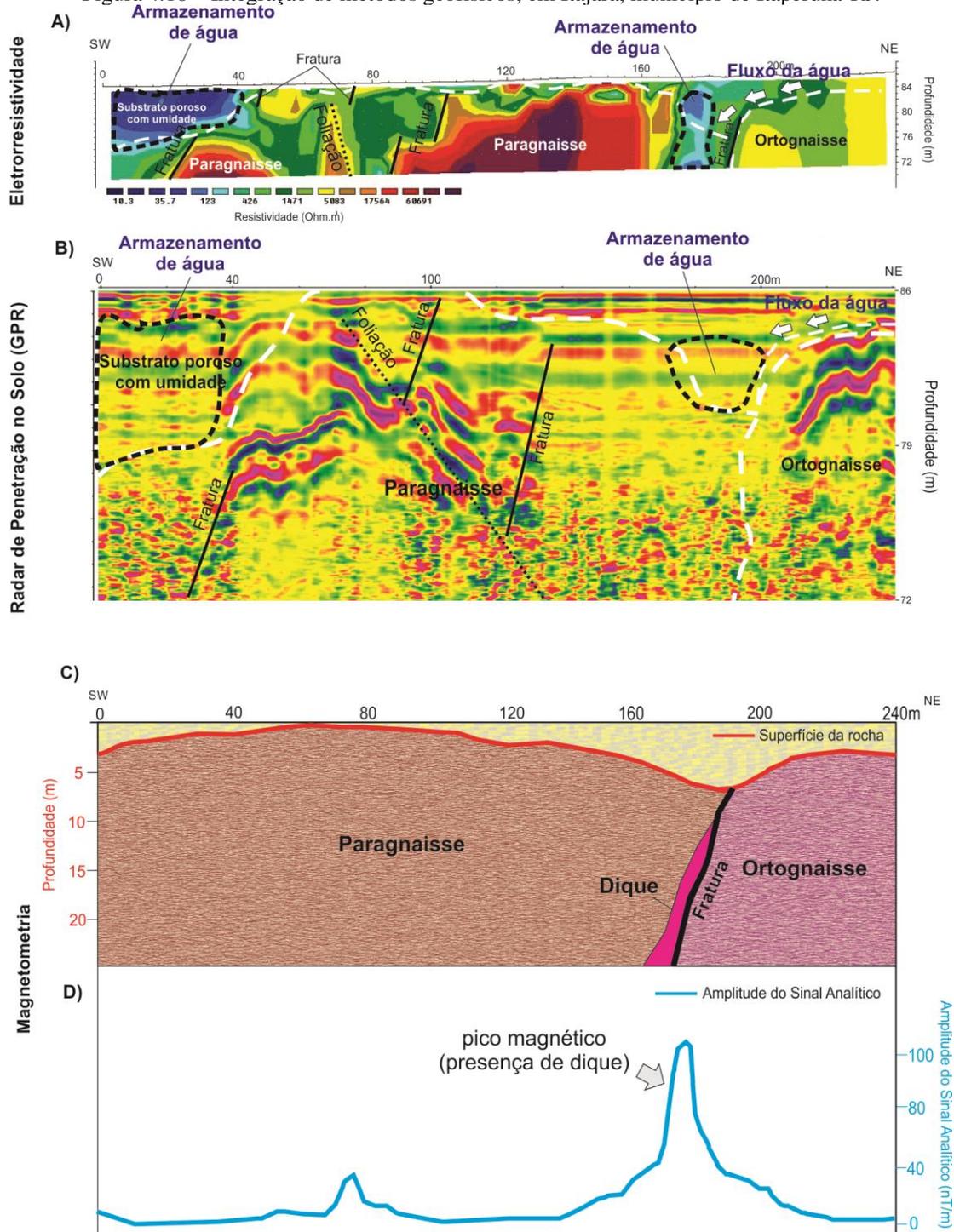
O perfil do método elétrico (Figura 4.18A) exibe duas anomalias de resistividade inferiores a 100 Ohm.m, associadas à presença de água. A primeira, a SW da seção, está relacionada a um substrato poroso com aproximadamente 6 metros de espessura. A segunda anomalia, a 180 metros do início da seção, foi interpretada como uma fratura no contato entre o paragnaisse e o ortognaisse.

O perfil eletromagnético (Figura 4.18B) ressalta a presença de fraturas, o contato entre os dois litotipos, o substrato poroso e a foliação da rocha, definindo a direção preferencial do fluxo para uma zona com potencial armazenamento de água. Os volumes de água exibem assinatura marcante e coincidem com os locais indicados pelo método elétrico.

O perfil magnético da topografia do embasamento mostra o delineamento da zona de contato entre o paragnaisse e o ortognaisse a aproximadamente 190 m do início da aquisição geofísica (Figura 4.18C). O perfil da amplitude do Sinal Analítico (Figura 4.18D) indica que a

fratura está associada à presença de dique com susceptibilidade magnética superior à rocha encaixante, gerando uma anomalia positiva (“pico”) na seção. Em função da estrada ser estreita e delimitada por barrancos, não foi possível realizar a aquisição magnetométrica em malha, visando a produzir o mapa da topografia do embasamento.

Figura 4.18 – Integração de métodos geofísicos, em Itajara, município de Itaperuna-RJ.



Legenda: (A) perfil de eletrorresistividade; (B) perfil do método eletromagnético (GPR); (C) topografia do embasamento; (D) Amplitude do Sinal Analítico.

Fonte: a autora.

Devido à pecuária ser a principal atividade econômica desenvolvida na localidade rural de Itajara, a vegetação secundária foi quase toda substituída por pastagens, aumentando o escoamento superficial e diminuindo a água infiltrada no solo. O solo é classificado como argissolo vermelho-amarelo, com textura média/argilosa a argilosa. As porções mais elevadas topograficamente exibem latossolos. As drenagens mais próximas do perfil geofísico ficam a 20 m e não há conexão direta com a linha pesquisada. Portanto, a área apontada como potencial reservatório para a captação de água consiste em uma zona alimentada pelo escoamento direcionado pela foliação da rocha e por uma rede de fraturas.

#### 4.4. Identificação de poços não cadastrados no SIAGAS

Tendo em vista a importância de se manter atualizadas as informações sobre os mananciais, durante a pesquisa das áreas potenciais para a captação de água subterrânea optou-se pelo registro do posicionamento geográfico dos poços não identificados no cadastro do SIAGAS (Tabela 4.1). Os dados serão fornecidos às prefeituras dos respectivos municípios para auxiliar na gestão dos recursos hídricos. Na região de Itajara, município de Itaperuna – RJ, não foram identificados poços não cadastrados no SIAGAS.

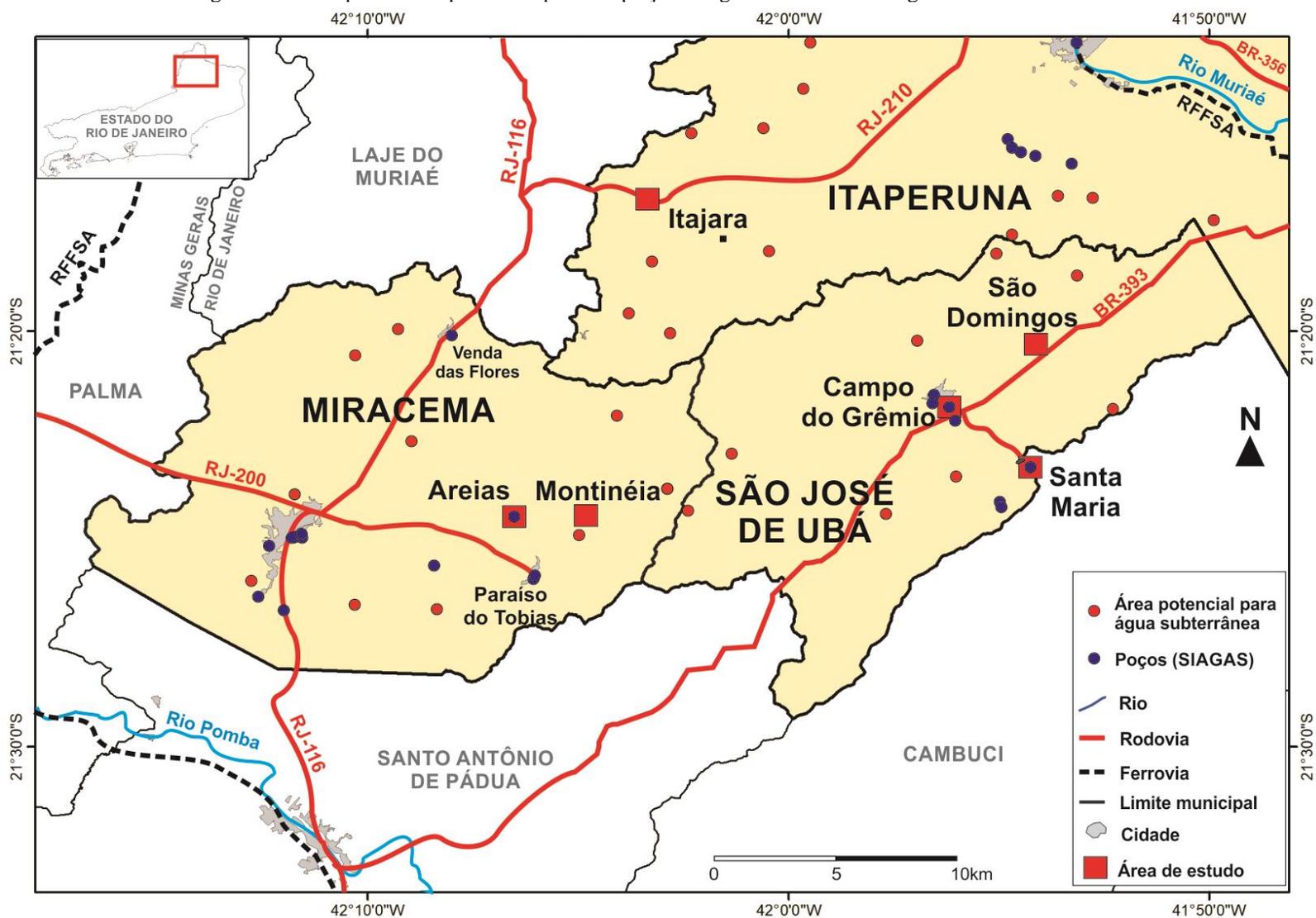
Tabela 4.1 – Poços não cadastrados no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) obtidos na pesquisa de campo.

<b>Município</b>	<b>Localidade</b>	<b>Longitude (m)</b>	<b>Latitude (m)</b>	<b>Altitude (m)</b>
São José de Ubá	Vila Cambiocó	196.549	7.631.053	137
São José de Ubá	Vila Cambiocó	196.637	7.630.792	135
São José de Ubá	Vila Cambiocó	196.708	7.630.815	135
São José de Ubá	Vila Cambiocó	196.821	7.630.830	135
São José de Ubá	Vila Cambiocó	197.085	7.630.675	139
São José de Ubá	Vila Cambiocó	196.238	7.629.891	151
São José de Ubá	Vila Cambiocó	196.507	7.629.885	153
São José de Ubá	Estr. para St <sup>a</sup> Maria	196.228	7.633.309	124
São José de Ubá	Estr. para St <sup>a</sup> Maria	199.110	7.632.517	149
Miracema	Próx. Montinéia	802.300	7.629.760	115
Miracema	Próx. Montinéia	802.076	7.629.737	118
Miracema	Areias	799.544	7.630.351	151

#### 4.5. Áreas potenciais para a captação de água subterrânea

A partir das informações integradas neste trabalho, relacionadas à caracterização geofísica, clima, morfologia, vegetação, solos, hidrografia, hidrogeologia, uso e ocupação do solo e geologia, elaborou-se um mapa com outras áreas potenciais para a captação de água subterrânea (Figura 4.19) sobre a extensão da base cartográfica do IBGE (2015 e 2020). Os locais indicados requerem a realização de campanhas geofísicas terrestres visando a identificar os padrões de assinatura compatíveis com a presença de estruturas geológicas (fraturas e falhas), rochas e água subterrânea, auferindo resultados mais precisos nas áreas favoráveis à locação de poços.

Figura 4.19 – Mapa de áreas potenciais para a captação de água subterrânea na região noroeste fluminense.



Legenda: Área potencial de captação de água subterrânea, destacado com ponto vermelho.

Fonte: a autora

## 5. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

A captação de recursos hídricos subterrâneos como alternativa aos sistemas convencionais de abastecimento, quando realizada de forma apropriada, mostra-se como uma opção para mitigar as adversidades de origens naturais e humanas e, pode contribuir para o fornecimento sustentável de água e manutenção das atividades agrícola e pecuária na região.

A pesquisa desenvolvida neste trabalho foi efetiva para revelar áreas com a presença de água subterrânea, fundamentada nas assinaturas dos métodos geofísicos integrados (elétrico, magnético e eletromagnético) e na investigação geológica, geomorfológica, de vegetação etc. das áreas onde existem poços. O mapa elaborado com a indicação georreferenciada dos locais potenciais de captação para fins de exploração do recurso subterrâneo pode diminuir o tempo de pesquisa, o dispêndio de recursos e aumentar as chances de sucesso para a locação de poços. Os volumes mais elevados de água podem ser obtidos especialmente quando o trabalho for associado ao uso dos métodos de investigação geofísica. O uso dos métodos geofísicos nesses locais serve para indicar a direção dos fluxos no subsolo e apontar as zonas com fraturas nas rochas e os contatos entre litologias, elementos identificados no trabalho com maior potencial de armazenamento.

A integração de informações geológicas, ambientais e geofísicas mostrou-se satisfatória para distinguir as zonas de recarga com mais potencialidade de infiltração de água no solo, os locais propícios ao armazenamento e, indicar, espacialmente, áreas com a possibilidade da presença de água subterrânea, em profundidades de até 30 metros. Portanto, as regiões estudadas mostram-se potenciais para a captação de água subterrânea.

O georreferenciamento dos poços artesianos presentes nas áreas de estudo e não cadastrados no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS/CPRM) poderá contribuir para futuros estudos sobre a disponibilidade hídrica subterrânea na região.

### Recomendações

Recomenda-se a consolidação de políticas públicas que contemplem o saneamento básico, o registro dos poços e a fiscalização, para prevenir ocorrências de contaminação das águas e/ou a perfuração exagerada de poços em um mesmo local. O registro do posicionamento geográfico dos poços não cadastrados no SIAGAS abrirá a possibilidade de se estabelecer protocolos e canais de orientação aos usuários sobre os procedimentos a serem cumpridos na manutenção e preservação da água em subsuperfície. Esta prática, se realizada

de maneira sistemática poderá contribuir para os futuros estudos sobre a disponibilidade hídrica subterrânea na região.

Recomenda-se também a realização de estudos complementares visando a contribuir, de forma quantitativa, na detecção de volumes de água subterrânea. As investigações devem envolver a identificação da superfície potenciométrica e direção do fluxo subterrâneo (rede de fluxo), para a definição dos locais mais propícios para a implantação de poços.

Nos demais locais indicados como potenciais para a captação de água subterrânea (Figura 4.19) sugere-se a execução de campanhas geofísicas visando a identificar os padrões de assinatura compatíveis com a presença de água subterrânea, estruturas geológicas (fraturas e falhas) e substratos porosos.

Considerando os poucos fragmentos de vegetação observados durante as campanhas para o levantamento de dados, verificou-se a necessidade de se realizar ações de recuperação (replanteio de vegetação), pois esta contribui para a permeabilidade dos solos e, conseqüentemente, para a recarga dos mananciais. Essas medidas podem evitar a escassez de água nas reservas subterrâneas e a ocorrência de poços secos em períodos prolongados de estiagem.

No intuito de ampliar o conhecimento acerca dos recursos hídricos subterrâneos no noroeste fluminense pode-se utilizar a metodologia de pesquisa deste trabalho nos municípios circunvizinhos que possuam características geológicas, hidrogeológicas e topográficas semelhantes.

## REFERÊNCIAS

ABIDIN, H.Z., *et al.* Land subsidence of Jakarta (Indonesia) and its relation with urban development. *Nat Hazards* 59, 1753. 2011. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9866-9>. Acesso em 08 de janeiro de 2021.

ADEOTI, L., *et al.* Seismic Refraction Prospecting for Groundwater: A Case Study of Golden Heritage Estate, Ogun State. 2012. *Research Journal of Physics*, 6: 1-18. DOI: 10.3923/rjp.2012.1.18. Disponível em: <<https://scialert.net/abstract/?doi=rjp.2012.1.18>>. Acesso em: 25 fev 2020.

AGEVAP. Associação Pró-Gestão das Águas da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul. Complementação e Finalização do Plano integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul - PIRH-OS e Elaboração dos planos de recursos Hídricos das Bacias Hidrográficas Afluentes. AGEVAP/CEIVAP. 2018. Disponível em: <[http://www.sigaceivap.org.br:8080/publicacoesArquivos/ceivap/arq\\_pubMidia\\_Processo\\_030-2018-PT.pdf](http://www.sigaceivap.org.br:8080/publicacoesArquivos/ceivap/arq_pubMidia_Processo_030-2018-PT.pdf)> Acesso em: 02 jul 2020.

\_\_\_\_\_. Associação Pró-Gestão das Águas da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul. Plano integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul e Planos de Ação de recursos Hídricos das Bacias Afluentes. 2013. Disponível em: <<http://ceivap.org.br/conteudo/rp-03-avaliacao-quali-quantitativa-da-rede-de-monitoramento-revisao-final.pdf>>. Acesso em: 30 Jan 2021.

AIT BAHAMMOU, Y. *et al.* Fracture zones detection for groundwater exploration integrating Resistivity Profiling and Very Low Frequency electromagnetic methods. *Contributions to Geophysics and Geodesy. Errachidia basin, Morocco*. Vol. 49/2. p.181–194. 2019. doi: 10.2478/congeo-2019-0009.

AKINSUNMADE, A. *et al.* Finite-difference time domain (FDTD) modeling of ground penetrating radar pulse energy for locating burial sites. *Acta Geophys.* 67, p.1945–1953. 2019. <https://doi.org/10.1007/s11600-019-00352-9>.

ALFY, M.E. *et al.* Quantitative hydro-geophysical analysis of a complex structural karst aquifer in Eastern Saudi Arabia. *Sci Rep* 9, 2825. 2019. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-39192-4>. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/s41598-019-39192-4>>. Acesso em: 17 fev 2020.

ALWAN, I. A. K. Comparison between Conventional Arrays in 2D Electrical Resistivity Imaging Technique for Shallow Subsurface Structure Detection of the University of Technology Eng. & Tech. *Journal*, Vol. 31, Part (A), No.10, 2013.

AMBDATA. Variáveis ambientais para modelagem de distribuição das espécies: Declividade ou Gradiente. Disponível em: <[http://www.dpi.inpe.br/Ambdata/declividade\\_gradiente.php](http://www.dpi.inpe.br/Ambdata/declividade_gradiente.php)>. Acesso em: 03 jun. 2020.

ANA. Agência Nacional de Águas. Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada /. Agência Nacional de Águas. -- Brasília: ANA, 2017. 86 p. il. ISBN 978-85-8210-051-6. 1.

\_\_\_\_\_. Agência Nacional de Águas (Brasil). Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2018: informe anual / Agência Nacional de Águas. Brasília: ANA, 2018.

\_\_\_\_\_. Agência Nacional de Águas (Brasil). Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2019: informe anual / Agência Nacional de Águas. Brasília: ANA, 2019.

\_\_\_\_\_. Agência Nacional de Águas (Brasil). Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2020: informe anual / Agência Nacional de Águas. Brasília: ANA, 2020.

\_\_\_\_\_. Agência Nacional de Águas. Previsão de Eventos Críticos na Bacia do Rio Paraíba do Sul, R 02 – Coleta de Dados Engecorps - Brasília: Engecorps, SUM, 2010. 285p.

ANDRÉ, J. L. F. Comparação entre o complexo Juíz de Fora e a Unidade Granulítica Ponte de Zinco: geocronologia U-pb em zircão (L-ICPMS), geoquímica isotópica e composição das fontes geradoras / Jefferson Lima Fernandes André = 2014. 214 f : il.

ANNAN, A. P.; COSWAY, S. W. (1992). Ground Penetrating Radar. Survey Design. Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 1992. doi:10.4133/1.2921946.

ARANTES, J. T. Como produzir arroz com baixo consumo de água. Revista Pesquisa FAPESP. 2013. Disponível em: <<https://revistapesquisa.fapesp.br/2013/05/08/como-produzir-arroz-com-baixo-consumo-de-agua/>>. Acesso em: 24 abr 2020.

ARCHIE, G.E., Introduction to Petrophysics of Reservoir Rocks, AAPG Bulletin, v.34, n.5, p. 943-961, 1950.

ARSÈNE, Meying *et al.* Hydrogeophysical Investigation for Groundwater Resources from Electrical Resistivity Tomography and Self-Potential Data in the Méiganga Area, Adamawa, Cameroon. International Journal of Geophysics. 2018. DOI : 10.1155/2018/2697585. Disponível em: < <https://www.hindawi.com/journals/ijge/2018/2697585/>>. Acesso em 27 fev 2020.

AZIMAN, M.; HAZREEK, Z. A. M.; AZHAR, A. T. S.; FAHMY, K. A.; FAIZAL, T. B. M.; SABARIAH, M.; AMBAK, K; ISMAIL, M. A. M. Electrical Resistivity Technique for Groundwater Exploration in Quaternary Deposit. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 995 012110. Malaysia. 2018. <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/995/1/012110>.

BACK, A.J.; JUST, M.C. CONSUMO DE ÁGUA EM LAVOURAS DE ARROZ IRRIGADAS EM SISTEMA COLETIVO. Revista Tecnologia e Ambiente, v. 24, 2018, Criciúma, Santa Catarina/SC.

BARRETO, A. C. DA C.; MONSORES, A.L.M.; LEAL, A. de S.; PIMENTEL, J. 2000. Hidrogeologia do Estado do Rio de Janeiro-Texto Explicativo do Mapa de Favorabilidade Hidrogeológica do Estado do Rio de Janeiro. CPRM/DRM.

BARKER, R. D., 1989, Depth of investigation of collinear symmetrical four-electrode arrays: Geophysics, v. 54, no. 8, p. 1031-1037.

BBC NEWS. Jakarta, the fastest-sinking city in the world. By Mayuri Mei Lin & Rafki Hidayat. BBC Indonesian. 13 August 2018.

Disponível em: <<https://www.bbc.com/news/world-asia-44636934>> Acesso em: 07 fev 2020.

BERRE, I., DOSTER, F.; KEILEGAVLEN, E. Flow in Fractured Porous Media: A Review of Conceptual Models and Discretization Approaches. *Transp Porous Med* 130, 215–236. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11242-018-1171-6>>. Acesso em: 17 fev 2020.

BLANCO, F.F; FOLEGATTI, M.V. Manejo da água e nutrientes para o pepino em ambiente protegido sob fertirrigação o pepino. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.6, n.2, p.251-255, 2002.

BLOXHAM, J.; GUBBINS, D.; JACKSON, A. Geomagnetic secular variation. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, v. 329, n. 1606, p. 415–502, 1989.

BRAGA, A.C.O. Métodos da Eletroresistividade e Polarização Induzida Aplicados nos Estudos da Captação e Contaminação de Águas Subterrâneas: Uma Abordagem Metodológica e Prática. Tese de Livre-Docência na disciplina Métodos Geométricos Aplicados à Hidrogeologia do Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente do Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista - Unesp. 121p. 2006.

\_\_\_\_\_. Geofísica aplicada: métodos geométricos em Hidrogeologia. São Paulo, 2016. 159 p.

\_\_\_\_\_. Métodos Geométricos Aplicados – Módulo Hidrogeologia, material didático. 2002. Disponível em: <[www.rc.unesp.br/](http://www.rc.unesp.br/) ou [acobra@rc.unesp.br](mailto:acobra@rc.unesp.br)>. Acesso em: 02 mar 2020.

BRASIL. Constituição (1988). Constituição da República Federativa do Brasil. Brasília: Senado Federal. Subsecretaria de Edições Técnicas, 2008.

\_\_\_\_\_. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política nacional do Meio Ambiente. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/L6938.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L6938.htm)> Acesso em: 02 fev 2021.

\_\_\_\_\_. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/L6433.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L6433.htm)>. Acesso em: 02 fev 2021.

\_\_\_\_\_. Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/19605.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19605.htm)>. Acesso em: 02 fev 2021.

\_\_\_\_\_. Lei nº 9.795, de 27 de abril de 1999. Dispõe sobre a educação ambiental, institui a Política Nacional de Educação Ambiental e dá outras providências. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/19795.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19795.htm)>. Acesso em: 02 fev 2021.

\_\_\_\_\_. Lei no 9.985, de 18 de julho de 2000. Institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/19985.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19985.htm)>. Acesso em: 02 Fev 2021.

BREWSTER, M.L.; ANNAN, A.P. Ground-penetrating radar monitoring of a controlled DNAPL release: 200 MHz radar: Geophysics, v. 59, p. 1211-1221. (1994). DOI: 10.1190/1.1443679

BRIXOVA, B.; MOSNÁ, A.; PUTIŠKA, R. Applications of Shallow Seismic Refraction Measurements in the Western Carpathians (Slovakia): Case Studies. 2018. Contributions to Geophysics and Geodesy. 48. 1-21. 10.2478/congeo-2018-0001. Disponível em: <DOI: 10.2478/congeo-2018-0001>. Acesso em: 25 fev 2020.

CALDERANO FILHO, B.; CHAGAS, C. da S.; PRADO, R. B.; PEREZ, D. V.; GONÇALVES, A. O.; SOUZA, J. S. de. Levantamento semidetalhado dos solos da microbacia do Barro Branco, no município de São José de Ubá, região noroeste do estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006.

CANADIAN WATER DIRECTORY. Water cycle. 2020. Sustainable infrastructure society. Disponível em: <<https://www.canadianwater.directory/wct-6-water-cycle>>. Acesso em 18 mar 2020.

CASHMAN, P M; PREENE, M. Groundwater Lowering in Construction: A Practical Guide to Dewatering. 2nd Edition. Boca Raton, London, New York. 2013. ISBN: 978-0-415-66837-8.

CAVALCANTI, S.S; SATO, H.K.; LIMA, O.A.L. Geofísica Elétrica na Caracterização da Hidrologia Subterrânea na Região do Aterro Metropolitano Centro, Salvador. Revista Brasileira de Geofísica. São Paulo, v. 19, n° 2, mai/ago 2001.

CEDAE. Companhia Estadual de Águas e Esgotos. Relatório Anual de informação aos usuários (Itaperuna). 2018. Disponível em: <[https://www.cedae.com.br/portals/0/relatorio\\_anual/2018/Itaperuna.pdf](https://www.cedae.com.br/portals/0/relatorio_anual/2018/Itaperuna.pdf)>. Acesso em: 11 dez 2020.

\_\_\_\_\_. Companhia Estadual de Águas e Esgotos. Relatório Anual de informação aos usuários (Miracema). 2018. Disponível em: <[https://www.cedae.com.br/portals/0/relatorio\\_anual/2018/miracema.pdf](https://www.cedae.com.br/portals/0/relatorio_anual/2018/miracema.pdf)>. Acesso em: 07 jul 2020.

\_\_\_\_\_. Companhia Estadual de Águas e Esgotos. Relatório Anual de informação aos usuários (São José de Ubá). 2018. Disponível em: <[https://www.cedae.com.br/portals/0/relatorio\\_anual/2018/saojosedeuaba.pdf](https://www.cedae.com.br/portals/0/relatorio_anual/2018/saojosedeuaba.pdf)>. Acesso em: 07 jul 2020.

CEPERJ. Centro Estadual de Estatísticas, Pesquisas e Formação de Servidores Públicos do Rio de Janeiro. Mapa das regiões de governo do ERJ. 2018. Fundação CEPERJ, 2018. Disponível em: <<http://www.ceperj.rj.gov.br/Conteudo.asp?ident=79>>. Acesso em: 04 mai 2020.

\_\_\_\_\_. Centro Estadual de Estatísticas, Pesquisas e Formação de Servidores Públicos do Estado do Rio de Janeiro. 2019. Vegetação Noroeste fluminense.

CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Qualidade das águas subterrâneas no estado de São Paulo [recurso eletrônico]: boletim 2019 / CETESB. São Paulo: CETESB, 2020. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/aguas-subterraneas/wp-content/uploads/sites/13/2020/09/Aguas-Subterraneas-Boletim-2019.pdf>>. Acesso em: 30 jan 2021.

CLIMATE-DATA.ORG. Clima no noroeste do Rio de Janeiro. 2019. Disponível em: <<https://pt.climate-data.org/>>. Acesso em: 13 ago 2019.

CHANDRA, P. C. Groundwater geophysics in hard rock. CRC Press/Balkema. P.O. Box 11320, 2301 EH Leiden, The Netherlands. 2016. ISBN 978-0-415-66463-9 (hardcover) – ISBN 978-0-203-09367-2 (ebook).

CNRH - Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Resolução nº 15. Estabelece diretrizes gerais para a gestão de águas subterrâneas. Disponível em: <<http://www.sema.df.gov.br/wp-content/uploads/2017/09/Resolucao-CNRH-n-15-de-2001.pdf>>. Acesso em: 02 Fev 2021.

\_\_\_\_\_. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Resolução nº 22. Estabelece diretrizes para inserção das águas subterrâneas no Plano de Recursos Hídricos. Disponível em: <<http://www.sema.df.gov.br/wp-content/uploads/2017/09/Resolucao-CNRH-n-15-de-2001.pdf>>. Acesso em: 02 Fev 2021.

\_\_\_\_\_. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Resolução nº 76. Estabelece diretrizes gerais para a integração entre a gestão de recursos hídricos e a gestão de águas minerais, termiais, gasosas, potáveis de mesa ou destinadas a fins balneários. Disponível em: <<https://cnrh.mdr.gov.br/aguas-subterraneas/17-resolucao-n-76-de-16-de-outubro-de-2007/file>>. Acesso em: 02 Fev 2021.

CORREIA, L. A. *et al.* Revista Águas Subterrâneas, v. 33, n.1, p. 87-101, 2019.

CPRM. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações. Fernando A.C. Feitosa. *et al.* (Coord. Org.) 3a ed. LABIHID, 2008. 812p. p(60-70).

\_\_\_\_\_. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Noções básicas sobre poços tubulares: cartilha informativa. COSTA FILHO, Walter Duarte; GALVÃO, Manoel Júlio da Trindade Gomes; LIMA, JOSIAS BARBOSA DE; LEAL, ONOFRE. 1998. Disponível em: <<http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/16636>>. Acesso em: 15 fev 2020.

\_\_\_\_\_. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Paleomagnetismo. Glossário geológico ilustrado. Winge, M. 2020. Disponível em: <<http://sigep.cprm.gov.br/glossario/>>. Acesso em: 29 mar 2020.

\_\_\_\_\_. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Mapa de declividade em percentual do relevo brasileiro. Centro de Desenvolvimento Tecnológico – CEDES. Departamento de Gestão Territorial – DEGET. 2010. Disponível em:

<<http://www.cprm.gov.br/publique/Gestao-Territorial/Gestao-Territorial/Mapa-de-Declividade-em-Percentual-do-Relevo-Brasileiro-3497.html>>. Acesso em: 24 mai 2020.

\_\_\_\_\_. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. SIAGAS. Sistema de Informações de Águas Subterrâneas. 2020. Poços cadastrados. Atualizado em: 10/01/2020. Disponível em: <<http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/index.php>>. Acesso em: 07 jan 2020.

CPRM/RIMAS. Projeto Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas. O que é RIMAS. Disponível em: <<http://rimasweb.cprm.gov.br/layout/apresentacao.php>>. Acesso em 02 Fev 2021.

DANIELS, D. J. Surface Penetrating Radar. The Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom. 300 p. 1996.

DANIELS, J. J. Ground Penetrating Radar Fundamentals. Department of Geological Sciences, The Ohio State University. Appendix to a report to the U.S.EPA, Region V. 2000. Disponível em: <[https://clu-in.org/download/char/GPR\\_ohio\\_stateBASICS.pdf](https://clu-in.org/download/char/GPR_ohio_stateBASICS.pdf)>. Acesso em: 09 abr 2020.

DANTAS, M. E; SHINZATO, E; MEDINA, A. I. de M; SILVA, C. R. da; PIMENTEL, J; LUMBRERAS, J. F; CALDERANO, S. B. Diagnóstico Geoambiental do Estado do Rio de Janeiro. BRASÍLIA, Dezembro, 2000.

de GRAAF, I.E.M., GLEESON, T., (Rens) van BEEK, L.P.H. *et al.* Environmental flow limits to global groundwater pumping. *Nature*. 574, 90–94 (2019). doi:10.1038/s41586-019-1594-4

DENTITH, M.; MUDGE, S. Electrical and electromagnetic methods. In *Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist* (pp. 235-350). 2014. Cambridge: Cambridge University Press. ISBN On line: 9781139024358. Disponível em: <doi:10.1017/CBO9781139024358.007>. Acesso em: 02 mar 2020.

DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL PROTECTION. Field Sampling Procedures Manual. Geophysical Techniques. Chapter 8 – 46p. New Jersey. April, 2011. Disponível em: <<https://www.nj.gov/dep/srp/guidance/fspm/pdf/fsmp2005.pdf>>. Acesso em: 24 fev 2020.

DER-RJ. Departamento de Estradas de Rodagem do Rio de Janeiro. Mapa rodoviário 2018. Disponível em: <<http://www.der.rj.gov.br/documentos/mapas/Mapa do Rio de Janeiro.pdf>>. Acesso em: 15 ago 2019.

DOMENICO, P. A.; SCHWARTZ, F. W. Physical and chemical hydrogeology. Wiley, New York: Wiley, 1990. 65p.

EASTON, Z.M.; BOCK, E. Soil and Soil Water Relationships. College of Agriculture and Life Sciences, Virginia Tech, 2016. VT/0216/BSE-194P. Disponível em: <<http://digitalpubs.ext.vt.edu/vcedigitalpubs/2481933593189246/MobilePagedArticle.action?articleId=13912#articleId13912>>. Acesso em: 14 fev 2020.

ELHAJ, K. Subsurface delineation and cavity investigation using geophysical methods in Gua Musang, Kelantan, Malaysia. 2016. DOI: 10.13140/RG.2.2.33212.85129.

EMATER-RIO. Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Estado do Rio de Janeiro. Acompanhamento Sistemático da Produção Agrícola – ASPA. Relatório por municípios do sistema aspa/agrogeo. Estado do Rio de Janeiro. Disponível em: <[http://www.emater.rj.gov.br/busca\\_assuntoData.asp](http://www.emater.rj.gov.br/busca_assuntoData.asp)>. Acesso em: 07 dez 2020.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Sistema de Produção da Bananeira Irrigada. Brasília, DF. 2019.

\_\_\_\_\_. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Embrapa Solos: Impactos da seca nas regiões Norte e Noroeste do RJ são discutidos na Alerj. Fernando Gregio (MTb 42.280/SP) São Paulo-SP. 2018.

\_\_\_\_\_. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Clima: classificação climática. 2019. Disponível em: <<https://www.cnpf.embrapa.br/pesquisa/efb/clima.htm>>. Acesso em: 13 ago 2019.

\_\_\_\_\_. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Irrigação na cultura do pimentão. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Brasília, DF. 2012.

\_\_\_\_\_. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. EMBRAPA / SOLOS. Mapa de reconhecimento de baixa intensidade dos solos do estado do Rio de Janeiro. 2003. Disponível em: <[http://geoinfo.cnps.embrapa.br/layers/geonode%3Aosolos\\_rj\\_lat\\_long\\_wgs84\\_1#more](http://geoinfo.cnps.embrapa.br/layers/geonode%3Aosolos_rj_lat_long_wgs84_1#more)>. Acesso em: 21 jul 2020.

\_\_\_\_\_. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Sistema brasileiro de classificação de solos. 5. ed. 356p. Brasília, DF: Embrapa 2018. ISBN: 978-85-7035-817. Disponível em: <<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1094003>>. Acesso em: 31 jul 2020.

ENCYCLOPÆDIA BRITANNICA, INC. Estuary: coastal feature. Ago, 2019. Disponível em: Encyclopædia Britannica, inc. ago, 2019. <<https://www.britannica.com/science/estuary>> Acesso em: 17 jan 2020.

EARTH OBSERVATORY OF SINGAPORE. P waves. FAQ on Earth Sciences. 2020. Disponível em: <<https://earthobservatory.sg/faq-on-earth-sciences/>>. Acesso em: 23 fev 2020.

ELIS, V.R; MENDONCA, C.A.; PORSANI, J.L. and STROBINO, E.F. O uso de sondagens dipolo-dipolo em estudos hidrogeológicos e de depósitos de resíduos. Rev. Bras. Geof. [online]. 2008, vol.26, n.3 [cited 2020-02-27], pp.317-325. <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2008000300005>. ISSN 0102-261X. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0102-261X2008000300005&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-261X2008000300005&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em: 13 mar 2020.

EPA. Environmental Protection Agency. South Australia. Environmental information: water salinity. 2018. Disponível em:

<[https://www.epa.sa.gov.au/environmental\\_info/water\\_quality/threats/salinity](https://www.epa.sa.gov.au/environmental_info/water_quality/threats/salinity)>. Acesso em: 15 jan 2020.

EVERETT, M. E. Near-surface applied geophysics. Cambridge University Press, New York. 2013. ISBN 978-1-107-01877-8 Hardback.

\_\_\_\_\_. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Thematic Paper 11. Managing the Invisible: The Governance and Political Economy of Groundwater. 590 p. Rome, FAO. April, 2016.

FERREIRA, C.R.C.; LA TERRA, E.F.; MENEZES, P.T.L. Modelagem geofísica para água subterrânea em aquíferos fissurais em São José de Ubá-RJ. In: WORKSHOP DE INTEGRAÇÃO DE INFORMAÇÕES OBTIDAS NO ÂMBITO DO PROJETO PRODETAB AQUÍFEROS, 1., 2006, Anais. Rio de Janeiro: Embrapa, 2006.

FERREIRA, S. L. M., MARQUES, R. DE A., MELO, M. G. DE, MEDEIROS JUNIOR, E. B. DE, REIS, S. V. DOS, SILVA, R. M., VALLE, H. DE F., & QUEIROGA, G. N. (2020). Petrografia e termobarometria de granitoides diatexíticos portadores de anfibólio da Região de São José de Ubá e São João do Paraíso (RJ). *Geologia USP. Série Científica*, 20(4), 23-37.

FIENEN M.N., ARSHAD M. The International Scale of the Groundwater Issue. In: Jakeman A.J., Barreteau O., Hunt R.J., Rinaudo JD., Ross A. (eds) *Integrated Groundwater Management*. Springer, Cham. 2016. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-23576-9\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-23576-9_2).

FOSSSEN, H. *Geologia estrutural*. Tradução: ANDRADE, Fábio Ramos Dias de. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos. 610 p. Cap. 9. 2017. ISBN:978-85-7975-283-4. eISBN:978-85-7975-284-1.

FUNDAÇÃO CENTRO DE INFORMAÇÕES E DADOS DO RIO DE JANEIRO (FUNDAÇÃO CIDE). IQM sustentabilidade fiscal: índice de qualidade dos municípios. [CD-ROM]. Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. Índice de qualidade dos municípios - IQM-Verde II [CD-ROM]. Rio de Janeiro, 2003.

GALLAS, J.D.F. O método do potencial espontâneo (SP): uma revisão sobre suas causas, seu uso histórico e suas aplicações atuais. *Rev. Bras. Geof.* [online]. 2005, vol.23, n.2, pp.133-144. ISSN 0102-261X. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2005000200003>.

GANDOLFO, O.C.B. *et al.* Estratigrafia rasa da Ilha Comprida (SP): um exemplo de aplicação do GPR. *Rev. Bras. Geof.*, São Paulo, v. 19, n. 3, p. 251-262, Dec. 2001. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2001000300002>.

GANDOLFO, O.C.B. Um estudo do imageamento geoeletrico na investigação rasa – Tese de Doutorado, Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo- Instituto de Geociências. 2007.

GANDOLFO, O.C.B.; GALLAS, J.D.F. O arranjo pólo-dipolo como alternativa ao dipolo-dipolo em levantamentos 2D de eletroresistividade. *Rev. Bras. Geof.*, São Paulo, v. 25, n. 3, p. 227-235, Sept. 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2007000300001>.

GE, S.; GORELICK, S. M. Hydrology, Floods and Droughts | Groundwater and Surface Water. 2015. Encyclopedia of Atmospheric Sciences, 209–216. DOI:<http://doi.org/10.1016/b978-0-12-382225-3.00171-7>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123822253001717>>. Acesso em: 13 fev 2020.

GONÇALVES, J. A. C.; SCUDINO, P. C. B.; SOBREIRA, F. G. Reservas Renováveis e Caracterização dos Aquíferos Fissurais do Leste da Zona da Mata de Minas Gerais e Adjacências. *Revista Geologia USP, Série Científica*, São Paulo, v. 5, n. 1, p. 19-27. 2005.

GRAHAM, S.; PARKINSON, C.; CHAHINE, M. The Water Cycle. NASA Earth Observatory, 2010. Disponível em: <<https://earthobservatory.nasa.gov/features/Water>>. Acesso em: 10 jan 2020.

GUNNARSDÓTTIR, E.L. The Earth's Magnetic Field. Physics Department School of Engineering and Natural Sciences. University of Iceland. Reykjavik, June 2012. p 5,6. Disponível em:< [https://skemman.is/bitstream/1946/12177/1/the\\_earths\\_magnetic\\_field.pdf](https://skemman.is/bitstream/1946/12177/1/the_earths_magnetic_field.pdf)>. Acesso em: 25 mar 2020.

GURK, M.; BOSCH, F. Cave detection using the Self-Potential-Surface (SPS) technique on a karstic terrain in the Jura mountains. Switzerland, 2001.

HAGER, F. P. V.; D'ALMEIDA, M. L. Legislação aplicada às águas subterrâneas. In: *Anais do VX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*. Natal: ABAS, 2008. P. 1 -16.

HEILBRON, M.; PIRES, F. R. M.; VALERIANO, C. M.; BESSA, M. Litoestratigrafia, evolução tectono-metamórfica e magmatismo no Precambriano do setor sudeste do Município do Rio de Janeiro. In: *SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE*, 3. 1993, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro, 1993.

HEILBRON, M.; VALERIANO, C. M.; VALLADARES, C.; MACHADO, N. A orogênese brasileira no segmento central da Faixa Ribeira, Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 25, n. 4, p. 249-266, 1995.

HEILBRON, M.; MACHADO, N. Timing of terrane accretion in the Neoproterozoic-Eopaleozoic Ribeira orogen (SE Brazil). *Precambrian Research*, v. 125, p. 87-112, 2003.

HEILBRON, M.; BRITO NEVES, B. B.; PIMENTEL, M. M.; PEDROSA-SOARES, A. C.; VALERIANO, C. M. Neoproterozoic orogenic systems in Eastern, Central and Northeastern Brazil and the assembly of Gondwana. In: *INTERNATIONAL GEOLOGICAL CONGRESS*, 31., 2000. *Extended Abstracts...* [S.l.], 2000.

HEILBRON, M.; VALERIANO, C. M.; ALMEIDA, J.; TUPINAMBA, M.; SIGA, O.; TROUW, R. Correlation of Neoproterozoic terranes between the Ribeira Belt, SE Brazil and its African counterpart: comparative tectonic evolution and open questions. *Geological Society Special Publication*, v. 294, p. 211-237. 2008.

HEILBRON, M.; DUARTE, B. P.; NOGUEIRA, J. R. The Juiz de Fora complex of the Central Ribeira belt, SE Brazil: a segment of Palaeoproterozoic granulitic crust thrust during the Pan-African Orogen. *Gondwana Research*, v.1, p. 373-382, 1998.

HELALY, A.S. Assessment of groundwater potentiality using geophysical techniques in Wadi Allaqi basin, Eastern Desert, Egypt – Case study, *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*. Volume 6, Issue 2, Pages 408-421, 2017. ISSN 2090-9977 DOI: [doi.org/10.1016/j.nrjag.2017.09.003](https://doi.org/10.1016/j.nrjag.2017.09.003).

HIRATA, R; SUHOGUSOFF, A.V.; MARCELLINI, S.S.; VILLAR, P.C.; MARCELLINI, L. A revolução silenciosa das águas subterrâneas no Brasil: uma análise da importância do recurso e os riscos pela falta de saneamento. [S.l: s.n.], 2019.

HOLLIS, J.M.; HOLMAN, I.P.; BURTON, R.G.O.; WILLERS, C.M.; PAVELLEY, D. A Digital Dataset of European Groundwater Resources at 1:500,000. (v. 1.0). 2002.

HWANG, Y. K.; ENDRES, A. L.; PIGGOTT, S. D.; PARKER, B. L. Long-term ground penetrating radar monitoring of a small volume DNAPL release in a natural groundwater flow field. *Journal of Contaminant Hydrology*, 97(1-2), 1–12. (2008). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2007.11.004>.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Panorama / municípios. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br>. Acesso em: 20 mai 2020.

\_\_\_\_\_. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo demográfico. MARTINS, Leonardo; CAVARARO, Roberto (Elaboração arquivo pdf). Manual técnico da vegetação brasileira. 2ed. ISBN 978-85-240-4272. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv63011>. Acesso em: 07 set 2019.

\_\_\_\_\_. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Divisão política do município de Miracema-RJ. 2017. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rj/miracema>. Acesso em: 07 set 2019.

\_\_\_\_\_. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Localização política do Estado do Rio de Janeiro. 2012. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rj/rio-de-janeiro/panorama>. Acesso em: 07 set 2019.

\_\_\_\_\_. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Mapa de clima do Brasil. Rio de Janeiro: IBGE, 2018. Escala 1:5.000.000. Disponível em: <https://inea.maps.arcgis.com/apps/MapSeries/index.html?appid=00cc256c620a4393b3d04d2c34acd9ed>. Acesso em: 29 abr 2020.

\_\_\_\_\_. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Mapa político do Estado do Rio de Janeiro. 2015. Disponível em: <https://mapas.ibge.gov.br/politico-administrativo/estaduais>. Acesso em: 07 set 2019.

\_\_\_\_\_. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística / Diretoria de Geociências (DGC) / Coordenação de Cartografia (CCAR). Classe Curva de Nível da Base Cartográfica Vetorial Contínua do Estado do Rio de Janeiro - 1:25.000. 2018. Disponível em: <http://www.geoservicos.ibge.gov.br/geoserver>. Acesso em: 21 mai 2020.

\_\_\_\_\_. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística / Diretoria de Geociências (DGC) / Coordenação de Cartografia (CCAR). Classe Trecho de Drenagem - 1:25.000 / Classe Trecho de Massa - 1:25.000. 2018.

Disponível em: < <http://www.geoservicos.ibge.gov.br/geoserver>>. Acesso em: 21 mai 2020.

\_\_\_\_\_. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Manual técnico de pedologia. Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. - 3. ed. - Rio de Janeiro: IBGE, 2015. 430 p. - il.- (Manuais técnicos em geociências, ISSN 0103-9598; n. 4). Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv95017.pdf>>. Acesso em: 09 jul 2020.

\_\_\_\_\_. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais – CREN. Mapa Hidrogeológico da Região Sudeste do Brasil - escala 1:1.800.000 (2018).

Disponível em: < <http://www.geoservicos.ibge.gov.br/geoserver>>. Acesso em: 21 mai 2020.

IGEL, J.; GUNTHER, T.; KUNTZER, M. Ground-penetrating radar insight into a coastal aquifer: the freshwater lens of Borkum Island. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, 519–531, (2013). [www.hydrol-earth-syst-sci.net/17/519/2013/](http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/17/519/2013/) doi:10.5194/hess-17-519-2013.

INEA. Instituto Estadual do Ambiente (RJ). Atlas dos mananciais de abastecimento público do Estado do Rio de Janeiro: subsídios ao planejamento e ordenamento territorial/Instituto Estadual do Ambiente; coordenação geral: Silvia Marie Ikemoto; coordenação executiva: Patrícia Rosa Martines Napoleão. – Rio de Janeiro, 2018. 464 p.: il. color. ISBN: 978-85-63884-24-4.

\_\_\_\_\_. Instituto Estadual do Ambiente. LOPES, Renata de Souza; ABRAHÃO, Janete; MELO, Gustavo (Org.). Plano Municipal de Conservação e Recuperação da Mata Atlântica de São Fidélis. Rio de Janeiro, 2015. 112 p.; p.19

Disponível em: <[www.inea.rj.gov.br/wp-content/uploads/2019/01/São-Fidélis](http://www.inea.rj.gov.br/wp-content/uploads/2019/01/São-Fidélis)> Acesso em: 21 set 2019.

\_\_\_\_\_. Instituto Estadual do Ambiente. (INEA RJ) / Diretoria de Biodiversidade, Área Protegidas e Ecossistemas (DIBAPE) / Coordenadoria de Gestão do Território e Informações Geoespaciais (COGET). Mapeamento do Uso e Cobertura do solo da Bacia do Paraíba do Sul no Estado do Rio de Janeiro - escala 1:25.000. (2015). Disponível em: <<https://inea.maps.arcgis.com/apps/MapSeries/index.html?appid=00cc256c620a4393b3d04d2c34acd9ed>>. Acesso em: 21 mai 2020.

\_\_\_\_\_. Instituto Estadual do Ambiente (INEA RJ) / Diretoria de Biodiversidade, Área Protegidas e Ecossistemas (DIBAPE) / Coordenadoria de Gestão do Território e Informações Geoespaciais (COGET). Mapeamento das Regiões Hidrográficas do Estado do Rio de Janeiro na escala 1:50.000 (2017). Disponível em: <<https://inea.maps.arcgis.com/apps/MapSeries/index.html?appid=00cc256c620a4393b3d04d2c34acd9ed>>. Acesso em: 21 mai 2020.

INEPAC. Instituto Estadual do Patrimônio Cultural. Histórico dos Municípios. Proderj, 2019. Disponível em <<http://www.inepac.rj.gov.br/index.php>> Acesso em: 07 set 2019.

INGLEZAKIS, V. J.; POULOPOULOS, S. G., ARKHANGELSKY, E.; Zorpas, A. A.; MENEGAKI, A. N. Aquatic Environment. Environment and Development. 2016. p137–212. doi:10.1016/b978-0-444-62733-9.00003-4.

ISO 14688-1. the International Organization for Standardization. Geotechnical investigation and testing — Identification and classification of soil — Part 1: Identification and description. 2017.

JAMAL, N.; SINGH, N. P. (2018). Identification of fracture zones for groundwater exploration using very low frequency electromagnetic (VLF-EM) and electrical resistivity (ER) methods in hard rock area of Sangod Block, Kota District, Rajasthan, India. Groundwater for Sustainable Development, 7, 195–203. DOI:<http://10.1016/j.gsd.2018.05.003>.

KALIRAJ, S.; CHANDRASEKAR, N.; MAGESH, N. S. (2014) Identification of potential groundwater recharge zones in Vaigai upper basin, Tamil Nadu, using GIS-based analytical hierarchical process (AHP) technique. Arabian Journal of Geosciences, v. 7, n. 4, p. 140 – 1385.

KARMANN, I. Decifrando a terra. TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C. M. de; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F. (Org.). 557p. São Paulo: Companhia editora Nacional, 2008. ISBN: 978-85-04-01173-9.

KISS. Keck Institute for Space Studies. Planetary Magnetic Fields: Planetary Interiors and Habitability. Final Report. p16. 2016.  
Disponível em: < [https://authors.library.caltech.edu/92812/1/Magnetic\\_final\\_report.pdf](https://authors.library.caltech.edu/92812/1/Magnetic_final_report.pdf)>. Acesso em: 25 mar 2020.

LANDMEYER, J. E. (2011). Fundamentals of Groundwater Hydrogeology. Introduction to Phytoremediation of Contaminated Groundwater, 95–114. 2011.doi:10.1007/978-94-007-1957-6\_4

LACHASSAGNE, P. Groundwater in granitic and metamorphic rocks?. Encyclopedia of the environment. 2019. Disponível em:  
<<https://www.encyclopedie-environnement.org/en/water/groundwater-in-granitic-and-metamorphic-rocks/>>. Acesso em: 21 mar 2020.

LEE, H.B.; KIM, B. Characterisation of hydraulically-active fractures in a fractured granite aquifer. Water SA, Pretoria, v. 41, n. 1, p. 139-148, Jan. 2015. Disponível em<<http://dx.doi.org/10.4314/wsa.v41i1.17>>. Acesso em: 10 mar 2020.

LEWIS, M A; CHENEY, CS; ÓDOCHARTAIGH, B É (2006). British Geological Survey. Guide to Permeability Indices. Open Report CR/06/160N. Keyworth, Nottingham. 2006.

LOKE, M.H. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies, a practical guide to 2D and 3D surveys, geoelectrical.com. 2000.

LOWRIE, W. Fundamentals of geophysics. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. 354p.

LUCIUS, J.E.; LANGER, W.H.; ELLEFSEN, K.J. An Introduction to using surface geophysics to characterize sand and gravel deposits: U.S. Geological Survey, Open-File Report, 51 p. 2006. Disponível em: <online at <http://pubs.usgs.gov/of/2006/1257/>>. Acesso em: 23 fev 2020.

LUMBRERAS, J. F.; CARVALHO FILHO, A.; MOTTA, P. E. F.; PALMIERI, F.; CALDERANO, S. B.; BARUQUI, A. M.; PEREIRA, N. R.; NAIME, U. J. 2004. Macropedoambientes da região Noroeste Fluminense: uma contribuição ao planejamento ambiental. Embrapa Solos /Documentos, n. 64, 21p. ISSN 1517-2627.

LUMBRERAS, J. F.; NAIME, U. J.; MOTTA, P. E. F. da; CARVALHO FILHO, A. de; PALMIERI, F.; BARUQUI, A. M.; CALDERANO, S. B.; FIDALGO, E. C. C. Levantamento de reconhecimento de média intensidade dos solos da bacia hidrográfica do rio São Domingos, municípios de São José de Ubá e Itaperuna, estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2008a.

LUMBRERAS, J.F. Relações Solo-Paisagem no Noroeste do Estado do Rio de Janeiro: Subsídios ao Planejamento de Uso Sustentável em Áreas de Relevo Acidentado do Bioma Mata Atlântica. 2008. 305p. Tese (Doutorado em Geografia) – Departamento de Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

LYATSKY, Henry. Magnetic and Gravity Methods in Mineral Exploration: the Value of Well-Rounded Geophysical Skills. Geoscience Research & Consulting Ltd., Calgary, Alberta, Canada. Vol. 35, Issue No. 08 2010.

Disponível em: <[https://csegrecorder.com/assets/pdfs/2010/2010-10-RECORDER-Magnetic\\_and\\_Gravity\\_Methods.pdf](https://csegrecorder.com/assets/pdfs/2010/2010-10-RECORDER-Magnetic_and_Gravity_Methods.pdf)>. Acesso em: 29 mar 2020.

MAHESWARI, K.; SENTHIL KUMAR, P.; MYSALIAH, D.; RATNAMALA, K.; SRI HARI RAO, M.; SESHUNARAYANA, T. Ground penetrating radar for groundwater exploration in granitic terrains: A case study from Hyderabad. Journal of the Geological Society of India, 81(6), 781–790. (2013). DOI: <http://doi.org/10.1007/s12594-013-0103-x>.

MAHMOUDZADEH, M. R.; FRANCES, A. P.; LUBCZYNSKI, M.; LAMBOT, S. (2012). Using ground penetrating radar to investigate the water table depth in weathered granites : Sardon case study, Spain. Journal of applied geophysics, 79, 17-26. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2011.12.009>.

MARTINEZ, A.; BRYNES, A.P. Modeling Dielectric-Constant Values of Geologic Materials: An Aid to Ground-Penetrating Radar Data Collection and Interpretation. Lawrence, Kans.: Kansas Geological Survey, 2001.

Disponível em: <<http://www.kgs.ku.edu/Current/2001/martinez/martinez.pdf>>. Acesso em: 09 abr 2020.

MARTINS, A. M., CAPUCCI, E., CETANO, L. C., CARDOSO, G.; BARRETO, MONSORES A. B. C. A. L. M., Leal, A. S; Viana, P. XIV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Curitiba. 2006.

MELO, M. S. Geofísica aplicada à arqueologia: Investigação no centro histórico Engenho Murututu, Belém, Pará. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa De Pós-Graduação em Geofísica, 2007.

MIASCHI, John. "What Percentage of the Earth's Water Is Drinkable?" WorldAtlas, Feb. 14, 2018.

Disponível em: < <https://www.worldatlas.com/articles/what-percentage-of-the-earth-s-water-is-drinkable.html>>. Acesso em: 10 jan 2020.

MMA. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. RESOLUÇÃO CONAMA nº 303, de 20 de março de 2002. Dispõe sobre parâmetros, definições e limites de Áreas de Preservação Permanente. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=299>>. Acesso em: 02 Fev 2021.

\_\_\_\_\_. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. RESOLUÇÃO CONAMA no 396, de 3 de abril de 2008. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras Providências. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=562>>. Acesso em: 02 Fev 2021.

\_\_\_\_\_. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. RESOLUÇÃO CONAMA nº 335, de 3 de abril de 2003. Dispõe sobre o licenciamento ambiental de cemitérios. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=359>>. Acesso em: 02 Fev 2021.

\_\_\_\_\_. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. RESOLUÇÃO CONAMA nº 420, DE 28 DE DEZEMBRO DE 2009. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=620>>. Acesso em: 02 Fev 2021.

\_\_\_\_\_. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. RESOLUÇÃO CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>>. Acesso em: 02 Fev 2021.

MOHAMMED NAZIFI, H.; GÜLEN, L. The use of electromagnetic and vertical electrical sounding methods in groundwater exploration. Bulletin of the Mineral Research and Exploration. Bull. Min. Res. Exp. (2019) 158: 327-344. DOI: <http://doi.org/10.19111/bulletinofmre.451557>.

MORSY, *et al.* Applying of High-Resolution Geophysical Techniques for Drainage Investigations at El-Basateen Cemetery Area, Cairo, Egypt. J Earth Sci Clim Change 9: 453. 2018. DOI: <http://doi.org/10.4172/2157-7617.1000453>.

MUTHAMILSELVAN, A.; SRIMADHI K.; NANDHINI R.; PAVITHRA P.; ALAMURUGAN, T. Spatial Confirmation of Major Lineament and Groundwater Exploration

using Ground Magnetic Method near Mecheri Village, Salem District of Tamil Nadu, India. *J Geol Geophys* 6: 274. (2017). DOI: <http://doi.org/10.4172/2381-8719.1000274>.

NATURE. Nature. com. Springer Nature Limited. Hydrogeology. 2020.

Disponível em: <<https://www.nature.com/subjects/hydrogeology>>. Acesso em: 08 fev 2020.

NEUENDORF, K. K. E.; MEHL, J. P.; JACKSON, J. A. Glossary of geology. Alexandria, Va, American Geological Institute, Edition: 5th ed. rev. p57. 2011. ISBN-10: 0922152896. ISBN-13: 978-0922152896.

NIMER, E. Ensaio de um novo método de classificação climática: contribuição à climatologia intertropical e subtropical, especialmente do Brasil. *Boletim de Geografia*. Rio de Janeiro, v. 31, n.277, p.141-153, 1972.

\_\_\_\_\_. E. Climatologia do Brasil. 2ª Edição. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 1989. 421p.

NOAA. National Oceanic and Atmospheric Administration. U.S. Department of Commerce. Water Cycle. 2019. Disponível em: <<https://www.noaa.gov/education/resource-collections/freshwater-education-resources/water-cycle>>. Acesso em: 18 mar 2020.

\_\_\_\_\_. National Oceanic and Atmospheric Administration. U.S. Department of Commerce. Types of precipitation. 2020.

Disponível em: <<https://www.weather.gov/jetstream/precipitypes>>. Acesso em: 18 mar 2020.

OLIVEIRA, T. P. de; LA TERRA, E. F.; PANETTO, L. P.; FONTES, S. L.; MAURYA, V. P. Hydrogeophysical characterization of groundwater conductors and storage geological structures through Audiomagnetotelluric and Electrical Resistivity Tomography Methods. Sixteenth International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Rio de Janeiro, Brazil, 19 to 22 August, 2019. Disponível em:

<[https://sbgf.org.br/mysbgf/eventos/expanded\\_abstracts/16th\\_CISBGf/Hydrogeophysical%20characterization%20of%20groundwater%20conductors%20and%20storage%20geological%20structures%20through%20Audiomagnetotelluric%20and%20Electrical%20Resistivity%20Tomography%20Methods.pdf](https://sbgf.org.br/mysbgf/eventos/expanded_abstracts/16th_CISBGf/Hydrogeophysical%20characterization%20of%20groundwater%20conductors%20and%20storage%20geological%20structures%20through%20Audiomagnetotelluric%20and%20Electrical%20Resistivity%20Tomography%20Methods.pdf)>. Acesso em: 12 mai 2020.

ONYEBUEKE, E O; MANZI, M S D; DURRHEIM, R J. High-resolution shallow reflection seismic integrated with other geophysical methods for hydrogeological prospecting in the Nylsvley Nature Reserve, South Africa. *Journal of Geophysics and Engineering*, Volume 15, Issue 6, December 2018, Pages 2658–2673. DOI: <http://doi.org/10.1088/1742-2140>.

PACIULLO, F. V. P. A. Sequência Depositional Andrelândia. 248f. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1997.

PEREIRA, Y.S. KILMMELMANN A.A. Availability and Consumption of Groundwater Resources in the Campinas Region, SP, Brazil. *TERRAE*, v1, n° 1. 2004.

PARK, S.; YI, M.-J.; KIM, J.-H.; SHIN, S.W. Electrical resistivity imaging (ERI) monitoring for groundwater contamination in an uncontrolled landfill, South Korea. *Journal of Applied Geophysics*, 135, 1–7. 2016. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.07.004>.

PESAGRO-RIO. Nº 92. On line (Cruz e Silva, Jorge Alves da; Oliveira, Luiz Antônio Antunes de) dezembro/2016. Niterói – RJ. ISSN 1983-6015. Disponível em: <<http://www.pesagro.rj.gov.br/downloads/infonline/online92.pdf>>. Acesso em: 24 abr 2020.

RAHAL, M. H.; LEAL, T. de Souza; PEDROSO-DE-MORAES. Ecologia e distribuição espacial de orquídeas terrícolas em Floresta Estacional Semidecidual do município de Araras, São Paulo, Brasil. IHERINGIA, Sér. Bot., Porto Alegre, v. 70, n. 2, p. 217 - 228, dezembro 2015.

RAJAPAKSE, R. Geotechnical Engineering Calculations and Rules of Thumb (Second Edition), Butterworth-Heinemann, 2016, 378p. Chap 3. p (33-34), ISBN 978-0-12-804202-1 <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804698-2.00049-0>. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128046982000490>>. Acesso em: 11 fev 2020.

RANZANI, G. Origem e desenvolvimento do solo. Piracicaba: ESALQ, 1969. 217p.

REYNOLDS, J.M. An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. John Wiley & Sons, London (UK). 712 p. 2011. ISBN 978-0-471-48535-3.

REVIL, A.; JARDANI, A. The Self-Potential Method: Theory and Applications in Environmental Geosciences. Cambridge University Press. 2013. ISBN 978-1-107-01927-0. Disponível em: <[https://assets.cambridge.org/97811070/19270/excerpt/9781107019270\\_excerpt.pdf](https://assets.cambridge.org/97811070/19270/excerpt/9781107019270_excerpt.pdf)>. Acesso em: 27 fev 2020.

RUBEL, F.; KOTTEK, M. Observed and projected climate shifts 1901-2100 depicted by world maps of the Köppen-Geiger climate classification. 2010. Meteorol. Z., 19, 135-141. DOI: <http://doi.org/10.1127/0941-2948/2010/0430>.

SANTANA, M.J.; PEREIRA, U.C.; BEIRIGO, J.D.C.; SOUZA, S.S.; CAMPOS, T.M.; VIEIRA, T.A. Coeficientes de cultura para o tomateiro irrigado. v. 16 n. 1 (2011): IRRIGA DOI: <https://doi.org/10.15809/irriga.2011v16n1p11>.

SCOTT, W. J. Geophysics for Mineral Exploration: A Manual for Prospectors. New found land and Labrador Department of Natural Resources. 2014.

SEBRAE. Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas. Painel Regional: Noroeste Fluminense/Observatório Sebrae. Rio de Janeiro: SEBRAE/RJ, 2015.

SEA. Secretaria de Estado do Ambiente. Instituto Estadual do Ambiente. Elaboração do plano estadual de recursos hídricos do estado do Rio de Janeiro: R3-B – temas técnicos estratégicos: RT-06 – avaliação do potencial hidrogeológico dos aquíferos fluminenses: revisão 05, 2014a. 54 p. Disponível em: <<http://www.inea.rj.gov.br/cs/groups/public/documents/document/zwew/mdyy/~edisp/inea0062144.pdf>>. Acesso em: 3 set 2020.

\_\_\_\_\_. Secretaria de Estado do Ambiente. Plano Municipal de Conservação e Recuperação da Mata Atlântica de Miracema / Secretaria de Estado do Ambiente. LOPES, Renata de Souza (Org.); ABRAHÃO, Janete (Org.); MELO, Gustavo. (Org.); Rio de Janeiro: SEA, 2015. 112 p.: il. color.; 30 cm. – (Série Planos da Mata Atlântica, 8).

\_\_\_\_\_. Secretaria de Estado do Ambiente. Plano Municipal de Conservação e Recuperação da Mata Atlântica de São José de Ubá / Secretaria de Estado do Ambiente. LOPES, Renata de Souza (Org.); ABRAHÃO, Janete (Org.); MELO, Gustavo. (Org.); Rio de Janeiro: SEA, 2015. 112 p.: il. color.; 30 cm. – (Série Planos da Mata Atlântica, 8).

SEMAI. Secretaria Municipal do Ambiente de Itaperuna. Plano de Manejo - APA Raposo, ReViS do Sagui da Serra Escuro e ReViS Monte Alegre (Alírio Braz). RJ- 2017.

SILVA, W. L.; DERECHYNSKI, C. P. Caracterização Climatológica e Tendências Observadas em Extremos Climáticos no Estado do Rio de Janeiro. Anuário do Instituto de Geociências UFRJ, Rio de Janeiro, v.37, n.2, p.123-138, 2014.

SILVEIRA, L.; USUNOFF, E. J. Groundwater: Encyclopedia of life support systems. Oxford, UK: [s.n.]. 2009.

SMITH, M.; CROSS, K.; PADEN, M.; LABAN, P. Spring – Managing groundwater sustainably. IUCN, Gland, Switzerland. 2016. ISBN: 978-2-8317-1789-0. DOI: <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2016.WANI.8.en>

SOFFIATI, A. Noroeste Fluminense: registros de um eco-historiador militante – 1. ed. – Rio de Janeiro. Autografia, 2018. ISBN 978-85-518-1488-8. 171p. p.3-10.

SOLDAL, O.; MAURING, E.; HALVORSEN, E.; RYE, N. Seawater intrusion and fresh groundwater hydraulics in fjord delta aquifers inferred from ground penetrating radar and resistivity profiles SunndalsØra and Esebotn, western Norway. Journal of Applied Geophysics, 32(4), 305–319. 1994. DOI: [http://doi.org/10.1016/0926-9851\(94\)90030-2](http://doi.org/10.1016/0926-9851(94)90030-2).

SOUZA, TEIXEIRA E BARBOSA. Água Subterrânea: Um Diagnóstico Preliminar das legislações brasileiras vigentes. Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais (GESTA) Gesta, v. 8, n. 1– p. 83-100, 2020 – ISSN: 2317-563X.

SUDAKOVA, M.S.; VLADOV, M.L. Modern Directions of Application of Ground-Penetrating Radar. Moscow Univ. Geol. Bull. 73, 219–228. 2018. DOI: <http://doi.org/10.3103/S0145875218030109>.

TCE-RJ. Tribunal de Contas do Estado do Rio de Janeiro. Estudos socioeconômicos dos Municípios do Estado do Rio de Janeiro: Laje do Muriaé. Secretaria Geral de Planejamento, 2016.

TELFORD, W.; GELDART, L.; SHERIFF, R. Applied Geophysics. Cambridge: Cambridge University Press. 1990. DOI: <http://doi.org/10.1017/CBO9781139167932>.

THÉBAULT, E.; FINLAY, C. C.; BEGGAN, C. D.; ALKEN, P.; AUBERT, J.; BARROIS, O.; BERTRAND, F.; BONDAR, T.; BONESS, A.; BROCCO, L.; CANET, E.; CHAMBODUT, A.; CHULLIAT, A.; COÏSSON, P.; CIVET, F.; DU, A.; FOURNIER, A.; FRATTER, I.; GILLET, N.; HAMILTON, B.; HAMOUDI, M.; HULOT, G.; JAGER, T.; KORTE, M.; KUANG, W.; LALANNE, X.; LANGLAIS, B.; LÉGER, J.-M.; LESUR, V.; LOWES, F. J.; MACMILLAN, S.; MANDEA, M.; MANOJ, C.; MAUS, S.; OLSEN, N.; PETROV, V.; RIDLEY, V.; ROTHER, M.; SABAKA, T. J.; SATURNINO, D.;

SCHACHTSCHNEIDER, R.; SIROL, O.; TANGBORN, A.; THOMSON, A.; TØFFNER-CLAUSEN, L.; VIGNERON, P.; WARDINSKI, I.; ZVEREVA, T. International geomagnetic reference field: the 12th generation. *Earth, Planets and Space*, v. 67, n. 79, p. 1–19, 2015.

THUSYANTHAN, N.I.; MADABHUSHI, S.P.G. Scaling of Seepage Flow Velocity in Centrifuge Models CUED/D-SOILS/TR326. Cambridge University Engineering Department. Mar, 2003.

Disponível em: < [http://www-civ.eng.cam.ac.uk/geotech\\_new/publications/TR/TR326.pdf](http://www-civ.eng.cam.ac.uk/geotech_new/publications/TR/TR326.pdf)>. Acesso em: 10 Fev 2020.

TODD, D. K.. *Groundwater Hydrology*, 2nd edition. 535p. New York, Chichester, Brisbane, Toronto: John Wiley, 1980. ISBN 0 471 87616 X.

UNESCO. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. World's groundwater resources are suffering from poor governance. UNESCO Natural Sciences Sector News. Paris, UNESCO. 2012.

VALENTA, J. *Introduction to Geophysics – Lecture Notes*. Czech Republic: development cooperation. 2015. Disponível em: <[http://www.geology.cz/projekt681900/english/learning-resources/Geophysics\\_lecture\\_notes.pdf](http://www.geology.cz/projekt681900/english/learning-resources/Geophysics_lecture_notes.pdf)>. Acesso em: 10 mar 2020.

VAN DER GUN, J. *Groundwater and Global Change: Trends, Opportunities and Challenges*. United nations world water assessment programme. UNESCO 2012. ISBN 978-92-3-001049-2.

VOZOFF, K. The Magnetotelluric Method, in Nabighian, M. N., Ed., *Electromagnetic methods in applied geophysics*, 2: SEG, pp. 641-711, 1991.

YUSUF, T. U. Overview of Effective Geophysical Methods Used in the Study of Environmental Pollutions by Waste Dumpsites. *African Research Review: An International Multi-disciplinary Journal*, Ethiopia. Vol. 10(2), Serial No.41, April, 2016: 123-143. ISSN 1994-9057 (Print) ISSN 2070-0083 (Online). DOI: <http://doi.org/10.4314/afrev.v10i2.8>.

WWAP. United Nations World Water Assessment Programme. *The United Nations World Water Development Report 2015: Water for a Sustainable World*. Paris, UNESCO. 2015.

ZEKÂI, Ş. *Practical and Applied Hydrogeology*. Elsevier, 2015. Page v. ISBN 9780128000755. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800075-5.03001-6>. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128000755030016>>. Acesso em: 11 fev 2020.

ZEKÂI Ş. *Applied Hydrogeology for Scientists and Engineers* 1st Edition. CRC Press; 1 edition 464 p. August 26, 1995. ISBN-10: 1566700914; ISBN-13: 978-1566700917.

# **ANEXO I**

Poços cadastrados no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS).

Número do Ponto	Poço	Município	Local	Situação	Natureza	Nível Estático (m)	Nível Dinâmico (m)	Vazão de Estabilização	Profundidade (m)	pH
3100004179	MIR-04	Miracema	Venda das Flores	Não Informado	Poço Tubular	Não Informado	Não Informado	Não Informado	Não Informado	Não Informado
3100004182	MIR-10	Miracema	Faz. S. Gabriel da Boa Viagem-Paraíso de Tobias/Miracema	Não Informado	Poço Tubular	12	25	7.2	110	Não Informado
3100004161	MIR-08	Miracema	Miracema	Obstruído	Poço Tubular	3	10	Não Informado	86	Não Informado
3100004162	MIR-11	Miracema	Horta Municipal-Parque de Exposição	Não Informado	Poço Tubular	Não Informado	Não Informado	Não Informado	80	Não Informado
3100004163	MIR-12	Miracema	Miracema Campestre Clube	Seco	Poço Tubular	Não Informado	Não Informado	Não Informado	Não Informado	Não Informado
3100004164	MIR-05	Miracema	Green Park Clube/Miracema	Não Informado	Poço Tubular	Não Informado	Não Informado	Não Informado	Não Informado	Não Informado
3100004177	MIR-09	Miracema	Cedae	Obstruído	Poço Tubular	1.8	4.5	Não Informado	80	Não Informado
3100004180	MIR-06	Miracema	Miracema	Abandonado	Poço Tubular	Não Informado	Não Informado	Não Informado	120	Não Informado
3100004184	MIR-01	Miracema	Miracema (Miramar Miracema Granitos e Mármore Ltda)	Não Informado	Poço Tubular	12	51	6.18	60	6.9
3100024363	MIR-13	Miracema	Polo Industrial II	Não Informado	Poço Tubular	1.92	25.81	Não Informado	Não Informado	Não Informado
3100004176	MIR-03	Miracema	Paraíso do Tobias/Miracema	Não Informado	Poço Tubular	4	32	Não Informado	Não Informado	Não Informado
3100004185	MIR-02	Miracema	Distrito de Areias-Miracema	Produzindo	Poço Tubular	Não Informado	Não Informado	Não Informado	Não Informado	Não Informado
3100004186	MIR-07	Miracema	Paraíso do Tobias-Miracema	Não Informado	Poço Tubular	Não Informado	Não Informado	Não Informado	100	Não Informado

Número do Ponto	Poço	Município	Local	Situação	Natureza	Nível Estático (m)	Nível Dinâmico (m)	Vazão de Estabilização	Profundidade (m)	pH
3100005784	S.J.U-07	São José de Ubá	Não Informado	Não Informado	Poço Tubular	8.4	18	19.5	95	Não Informado
3100005785	S.J.U-06	São José de Ubá	Valão de Areia	Não Informado	Não Informado	2.00	8.00	9.00	40	Não Informado
3100005786	S.J.U-05	São José de Ubá	Valão de Areia	Não Informado	Não Informado	Não Informado	Não Informado	Não Informado	Não Informado	Não Informado
3100005787	S.J.U-04	São José de Ubá	Poço Santa Maria	Produzindo	Poço Tubular	Não Informado	Não Informado	8.00	76	Não Informado
3100005788	S.J.U-03	São José de Ubá	Ceasa-RJ	Produzindo	Poço Tubular	Não Informado	Não Informado	Não Informado	Não Informado	Não Informado
3100005789	S.J.U-02	São José de Ubá	Faz. Sossego - P03	Não Informado	Não Informado	Não Informado	Não Informado	Não Informado	Não Informado	Não Informado
3100005790	S.J.U-01	São José de Ubá	R. Xv De Novembro	Produzindo	Poço Tubular	5.00	60.00	7.00	114	Não Informado
3100004236	Não Informado	Itaperuna	Distrito Raposo	Não Informado	Poço Tubular	Não Informado	Não Informado	Não Informado	Não Informado	Não Informado
3100004242	Não Informado	Itaperuna	Itaperuna	Não Informado	Poço Tubular	Não Informado	Não Informado	Não Informado	Não Informado	Não Informado
3100004245	Não Informado	Itaperuna	Natividade de Carangola	Não Informado	Poço Tubular	4.5	45	3.6	Não Informado	Não Informado
3100004250	Não Informado	Itaperuna	Natividade de Carangola	Não Informado	Poço Tubular	5	45	2	Não Informado	Não Informado
3100004254	Não Informado	Itaperuna	Natividade de Carangola	Não Informado	Poço Tubular	2.5	45	2	Não Informado	Não Informado
3100004261	Não Informado	Itaperuna	Hotel Fazenda	Não Informado	Poço Tubular	Não Informado	Não Informado	Não Informado	Não Informado	Não Informado
3100004262	Não Informado	Itaperuna	Nat. de Carangola-Raposo	Não Informado	Poço Tubular	5	45	6.5	Não Informado	Não Informado

Número do Ponto	Poço	Município	Local	Situação	Natureza	Nível Estático (m)	Nível Dinâmico (m)	Vazão de Estabilização	Profundidade (m)	pH
3100004266	Não Informado	Itaperuna	Parque das Águas Soledade - Raposo -	Não Informado	Poço Tubular	Não Informado	Não Informado	Não Informado	Não Informado	Não Informado
3100004270	Não Informado	Itaperuna	Sítio Santa Paz - BR 356 - Km 16	Não Informado	Poço Tubular	Não Informado	Não Informado	Não Informado	Não Informado	Não Informado
3100004271	Não Informado	Itaperuna	Distrito de Raposo	Não Informado	Não Informado	Não Informado	Não Informado	Não Informado	Não Informado	Não Informado
3100004275	Não Informado	Itaperuna	Raposo	Não Informado	Poço Tubular	6	42	2.29	Não Informado	Não Informado
3100004278	Não Informado	Itaperuna	Empresa Hidromineral Fluminense	Não Informado	Poço Tubular	6	51	5.35	Não Informado	Não Informado
3100004289	Não Informado	Itaperuna	Sítio São Sebastião	Não Informado	Não Informado	0	38	1.3	Não Informado	Não Informado
3100004296	Não Informado	Itaperuna	Rua Avahy, 02 - Raposo	Não Informado	Não Informado	2	28	4.2	Não Informado	Não Informado
3100004297	Não Informado	Itaperuna	Parque Águas Soledade - Raposo	Não Informado	Não Informado	0	15	6.1	Não Informado	Não Informado
3100004408	Não Informado	Itaperuna	Sítio São Sebastião	Não Informado	Poço Tubular	1.5	43	Não Informado	Não Informado	Não Informado
3100004220	Não Informado	Itaperuna	Não Informado	Não Informado	Não Informado	Não Informado	Não Informado	Não Informado	Não Informado	Não Informado
3100004221	Não Informado	Itaperuna	Não Informado	Não Informado	Não Informado	Não Informado	Não Informado	Não Informado	Não Informado	Não Informado
3100004222	Não Informado	Itaperuna	Não Informado	Não Informado	Poço Tubular	Não Informado	Não Informado	Não Informado	Não Informado	Não Informado
3100004237	Não Informado	Itaperuna	Rod. Cel. José Bastos, 894	Não Informado	Poço Tubular	Não Informado	Não Informado	Não Informado	Não Informado	Não Informado
3100004238	Não Informado	Itaperuna	Faz. Santo Antônio	Não Informado	Poço Tubular	Não Informado	Não Informado	Não Informado	Não Informado	Não Informado

Número do Ponto	Poço	Município	Local	Situação	Natureza	Nível Estático (m)	Nível Dinâmico (m)	Vazão de Estabilização	Profundidade (m)	pH
3100004240	Não Informado	Itaperuna	BR 356, Km 1 - Cidade Nova	Não Informado	Poço Tubular	Não Informado	Não Informado	Não Informado	Não Informado	Não Informado
3100004243	Não Informado	Itaperuna	Chácara Vale do Sol - Boa Fortuna	Não Informado	Poço Tubular	Não Informado	Não Informado	Não Informado	Não Informado	Não Informado
3100004259	Não Informado	Itaperuna	Rua Tomás Teixeira Dos Santos S/Nº	Não Informado	Poço Tubular	3	39	5.46	Não Informado	Não Informado
3100004260	Não Informado	Itaperuna	Orfanato Padre Geraldo-Vinhosa	Não Informado	Poço Tubular	5	45	0.9	Não Informado	Não Informado
3100004264	Não Informado	Itaperuna	Faz. Santo Antônio - Bambuí	Não Informado	Poço Tubular	2	22	9.3	Não Informado	Não Informado
3100004265	Não Informado	Itaperuna	Sítio Entroncamento	Não Informado	Não Informado	2	28	2.08	Não Informado	Não Informado
3100004267	Não Informado	Itaperuna	Rodovia BR 356 - Km 06	Não Informado	Poço Tubular	5	30	2.2	Não Informado	Não Informado
3100004269	Não Informado	Itaperuna	Centro Sócio Cultural N.Senhora Rosário de Fátima	Não Informado	Poço Tubular	6	52	5.67	Não Informado	Não Informado
3100004273	Não Informado	Itaperuna	Hospital da Criança	Não Informado	Poço Tubular	1	32	7.92	Não Informado	Não Informado
3100004274	Não Informado	Itaperuna	Colégio Agrícola	Não Informado	Poço Tubular	12	33	1.8	Não Informado	Não Informado
3100004276	Não Informado	Itaperuna	Centro	Não Informado	Poço Tubular	5	39	Não Informado	Não Informado	Não Informado
3100004277	Não Informado	Itaperuna	Halen Veículos Ltda-Cidade Nova	Não Informado	Poço Tubular	4	30	5.28	Não Informado	Não Informado
3100004295	Não Informado	Itaperuna	Fazenda Córrego do Ouro	Não Informado	Poço Tubular	0	38	Não Informado	Não Informado	Não Informado

Número do Ponto	Poço	Município	Local	Situação	Natureza	Nível Estático (m)	Nível Dinâmico (m)	Vazão de Estabilização	Profundidade (m)	pH
3100004397	Não Informado	Itaperuna	Capil	Não Informado	Poço Tubular	3	66	3.142	Não Informado	Não Informado
3100004398	Não Informado	Itaperuna	Itaperuna	Não Informado	Poço Tubular	3	18	Não Informado	Não Informado	Não Informado
3100004404	Não Informado	Itaperuna	Itaperuna	Não Informado	Poço Tubular	1	18	Não Informado	Não Informado	Não Informado
3100004406	Não Informado	Itaperuna	Itaperuna	Não Informado	Poço Tubular	2	29	Não Informado	Não Informado	Não Informado
3100004410	Não Informado	Itaperuna	Café Luana	Não Informado	Poço Tubular	Não Informado	Não Informado	Não Informado	Não Informado	Não Informado
3100004416	Não Informado	Itaperuna	Itaperuna (Poço Escavado/Cacimba)	Não Informado	Poço Escavado (Cacimba/Cisterna)	Não Informado	Não Informado	Não Informado	Não Informado	Não Informado
3100004417	Não Informado	Itaperuna	Itaperuna	Não Informado	Poço Tubular	1.5	13	Não Informado	Não Informado	Não Informado
3100004418	Não Informado	Itaperuna	Itaperuna	Não Informado	Poço Tubular	4	24	Não Informado	Não Informado	Não Informado
3100004419	Não Informado	Itaperuna	Haras Capelinha	Não Informado	Poço Tubular	2	18	Não Informado	Não Informado	Não Informado
3100004421	Não Informado	Itaperuna	Hospital São José do Avaí	Não Informado	Poço Tubular	4	86	Não Informado	Não Informado	Não Informado
3100023544	Não Informado	Itaperuna	Cubatão	Não Informado	Não Informado	5.48	27	0.64	Não Informado	Não Informado
3100004219	Não Informado	Itaperuna	Faz. Santa Alice	Não Informado	Poço Tubular	Não Informado	Não Informado	Não Informado	Não Informado	Não Informado
3100004268	Não Informado	Itaperuna	Córrego da Chica	Não Informado	Poço Tubular	1	31	5.012	Não Informado	Não Informado

Número do Ponto	Poço	Município	Local	Situação	Natureza	Nível Estático (m)	Nível Dinâmico (m)	Vazão de Estabilização	Profundidade (m)	pH
3100004272	Não Informado	Itaperuna	Córrego da Chica	Não Informado	Poço Tubular	19	59	15.84	Não Informado	Não Informado
3100004420	Não Informado	Itaperuna	Sítio Badaró/ 6º Distrito de Itaperuna	Não Informado	Poço Tubular	2.5	20	Não Informado	Não Informado	Não Informado

Legenda: MIR 02 – Profundidade de 126 m (Informação verbal). SJU 02 – Inacessível – Segundo informações locais, o poço está seco.

Fonte: Adaptado de SIAGAS (2020) e BARRETO *et. al.* (2000).

## **ANEXO II**

Mapa dos poços cadastrados no Sistema de Informações  
de Águas Subterrâneas (SIAGAS) dos municípios de Miracema,  
São José de Ubá e sudoeste de Itaperuna.

Anexo II - Mapa dos poços cadastrados no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) dos municípios de Miracema, São José de Ubá e sudoeste de Itaperuna, com dados oriundos da CPRM (2020).



Fonte: a autora.