unesp

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS E MEIO AMBIENTE

AVALIAÇÃO QUÍMICA E DE FLUXO DAS ÁGUAS EM ÁREA ÚMIDA SOBRE DIABÁSIO, CORDEIRÓPOLIS (SP).

ISABELLA DE OLIVEIRA FRANCO

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Campus de Rio Claro

Rio Claro - SP

2023

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"Júlio de Mesquita Filho"
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

ISABELLA DE OLIVEIRA FRANCO

AVALIAÇÃO QUÍMICA E DE FLUXO DAS ÁGUAS EM ÁREA ÚMIDA SOBRE DIABÁSIO, CORDEIRÓPOLIS (SP).

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geociências e Meio Ambiente.

Orientadora: Vania Silvia Rosolen

Rio Claro - SP
2023

F825a

Franco, Isabella de Oliveira
Avaliação química e de fluxo das águas em área úmida sobre diabásio, Cordeirópolis (SP). / Isabella de Oliveira Franco. -- Rio Claro, 2023
91 f. : il., tabs., fotos, mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro
Orientadora: Vania Silvia Rosolen

1. Áreas úmidas. 2. Hidroquímica. 3. Hidrologia. 4. Formação Serra Geral. 5. Depressão Periférica Paulista. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

Impacto potencial desta pesquisa[1]

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) são uma iniciativa global liderada pela Organização Nações Unidas (ONU), composta por 17 objetivos que visam promover e guiar um desenvolvimento sustentável até 2030, abrangendo questões como erradicação da pobreza, igualdade de gênero, acesso à educação, preservação do meio ambiente e promoção da paz. O presente trabalho contribui para os seguintes objetivos:

- ODS 6 – Água limpa e saneamento: o estudo da hidroquímica e hidrologia das áreas úmidas abordado neste trabalho permitirá avaliar a qualidade água, identificar riscos e fornecer subsídios para estratégias de gestão hídrica sustentável;
- ODS 13 – Combate às alterações climáticas: a presente pesquisa busca avaliar como as mudanças climáticas impactam a disponibilidade e qualidade da água em áreas úmidas, visto a influência do regime de chuvas e clima na disponibilidade de água e evapotranspiração;
- ODS 14 – Vida de baixo d'água: esta pesquisa destaca a importância da conservação e gestão sustentável de ecossistemas aquáticos, como as áreas úmidas, que estão ameaçadas, na região de estudo, pela substituição por atividades agrícolas;
- ODS 15 – Vida sobre a Terra: as áreas úmidas, além de serem importantes para a disponibilidade hídrica, também são ecossistemas complexos com grande biodiversidade dependente da preservação dessas regiões;
- ODS 17 – Parcerias em prol das metas: os resultados obtidos nessa pesquisa visam fornecer base científica para ações sociopolíticas de órgãos governamentais, ONGs e comunidades locais, promovendo uma melhor implementação de políticas públicas e iniciativas para a proteção e conservação das áreas úmidas e recursos hídricos.

[1] De acordo com a Portaria UNESP 117-2022 e Instrução AT-PROPG Nº02 (22/12/2022), passa a ser recomendado que todas as dissertações e teses, defendidas a partir dessa data apresentem uma descrição do impacto esperado relacionado aos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável.

Potential impact of this research

The Sustainable Development Goals (SDGs) are a global initiative led by the United Nations (UN), comprising 17 goals that aim to promote and guide sustainable development by 2030, covering issues such as eradicating poverty, gender equality, access to education, preserving the environment and promoting peace. This work contributes to the following objectives:

- SDG 6 – Clean water and sanitation: the study of the hydrochemistry and hydrology of wetlands addressed in this work will make it possible to assess water quality, identify risks and provide subsidies for sustainable water management strategies;
- SDG 13 – Climate action: this research seeks to assess how climate change impacts the availability and quality of water in wetlands, given the influence of rainfall and climate on water availability and evapotranspiration;
- SDG 14 – Life below water: this research highlights the importance of conservation and sustainable management of aquatic ecosystems, such as wetlands, which are threatened, in the study region, by replacement by agricultural activities;
- SDG 15 – Life on land: wetlands, in addition to being important for water availability, are also complex ecosystems with great biodiversity dependent on the preservation of these regions;
- SDG 17 – Partnerships for the goals: the results obtained in this research aim to provide a scientific basis for socio-political actions by government agencies, NGOs, and local communities, promoting better implementation of public policies and initiatives for the protection and conservation of wetlands and water resources.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“Júlio de Mesquita Filho”
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

ISABELLA DE OLIVEIRA FRANCO

AVALIAÇÃO QUÍMICA E DE FLUXO DAS ÁGUAS EM ÁREA ÚMIDA SOBRE DIABÁSIO, CORDEIRÓPOLIS (SP).

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geociências e Meio Ambiente.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Vania Silvia Rosolen
IGCE/UNESP/Rio Claro (SP)

Prof. Dr. Diego de Souza Sardinha
ICT/UNIFAL/Poços de Caldas (MG)

Dr. Lucas Moreira Furlan
Anglo American Brasil/Goiânia (GO)

Conceito: Aprovada.

Rio Claro (SP), 10 de julho de 2023.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos a todas as pessoas que estiveram ao meu lado durante essa jornada, apoiando-me e incentivando-me em cada etapa desse percurso desafiador.

Aos meus pais Eduardo e Raquel, pelo incentivo e compreensão por eu não estar presente em todos os momentos. Um agradecimento especial ao Gabriel, meu companheiro de vida, pelo apoio constante e por me manter sã.

Aos meus amigos e companheiros de jornada, meu mais profundo agradecimento. Vocês estiveram ao meu lado nos momentos de alegria e nos desafios, compartilhando experiências, sorrisos e lágrimas. Um agradecimento especial ao “pessoal das áreas úmidas”: Matheus, Lucas e André, fico grata de ter tido o apoio e contribuição de vocês. Em memória do colega de curso, Alan, que nos deixou antes de concluir essa jornada, expresso meus mais sinceros agradecimentos. Descanse em paz.

Um agradecimento especial para minha orientadora, Vânia Rosolen, que dedicou seu tempo, conhecimento e experiência para guiar-me nessa pesquisa. Sua orientação acadêmica e incentivo foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço por sua disponibilidade, paciência com as revisões infinitas e pelos ensinamentos valiosos que recebi ao longo dessa jornada.

Por fim, gostaria de agradecer a todos os professores, colegas de trabalho e demais pessoas que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho, em especial aos professores Diego, Rodrigo e César, por cada conversa, sugestão e colaboração que foram de extrema importância para o enriquecimento do meu conhecimento e para o aprimoramento deste estudo. Agradeço também a Tetra Tech e especialmente ao Nelson, pelo incentivo, compreensão e flexibilidade.

Mais uma vez, meu profundo agradecimento a todos que estiveram ao meu lado, seja de perto ou de longe, durante esta jornada. Seu apoio e encorajamento foram fundamentais para alcançar esse importante marco na minha trajetória acadêmica.

RESUMO

As áreas úmidas desempenham um papel crucial na regulação do fluxo de água em uma bacia hidrográfica, armazenando água da chuva, recarregando aquíferos e mantendo cursos d'água em períodos de estiagem. Compreender a dinâmica de fluxo e a hidroquímica nessas áreas é fundamental para a gestão sustentável dos recursos hídricos e segurança hídrica regional. Este estudo investigou a hidroquímica de uma área úmida desenvolvida sobre diabásio na Depressão Periférica Paulista, visando compreender o papel hidrogeológico e a evolução desse sistema dentro do contexto da paisagem, considerando possíveis impactos do uso da terra. Utilizando uma abordagem multi-metodológica, incluindo técnicas de campo, análises laboratoriais, modelagem hidrológica e interpretação de dados topográficos, foram obtidas informações sobre o fluxo de água, composição química e interação com os corpos hídricos da região. O monitoramento de nível d'água (raso) revelou a sazonalidade e a importância da chuva como principal fonte de entrada de água no sistema. As análises físicas e químicas classificaram a água como Sódica Bicarbonatada, evidenciando a influência sazonal, com picos de bicarbonato e carbonato durante as chuvas e concentrações de sódio e cloreto aumentando e durante os períodos de estiagem. Observou-se o acúmulo de sais nos poços a montante da área úmida, indicando que a região recebe e retém sais provenientes do cultivo circundante. A correlação positiva entre os íons Na, HCO3+CO3, SO4 e condutividade elétrica sugere que esses íons são liberados simultaneamente para a água devido à alteração dos minerais presentes no diabásio e no solo. Baixos teores de cálcio e magnésio sugerem que o saprólito ou a rocha não são as principais fontes dos íons dissolvidos. A correlação negativa entre PO43- e Ca, e PO43- e Mg sugere que a concentração de fosfato esteja condicionada pela adsorção e precipitação de fosfato de cálcio e magnésio. As análises de fluxo permitiram identificar a área úmida como um lago de fluxo, recebendo descarga de montante e recarregando a jusante, com sentido preferencial de fluxo para Leste. A análise morfológica relacionou a área úmida estudada com outras estruturas na paisagem e evidenciou sua possível contribuição para a nascente do Córrego Santa Gertrudes. Sugere-se que estudos futuros quantifiquem o tempo de residência da água na área úmida e investiguem detalhadamente sua origem e evolução.

Palavras-chave: Áreas úmidas; Hidroquímica; Hidrologia; Formação Serra Geral; Depressão Periférica Paulista.

ABSTRACT

Wetlands play a crucial role in regulating the waterflow in a watershed, storing rainwater, recharging aquifers, and maintaining watercourses in dry periods. Understanding flow dynamics and hydrochemistry in these areas is critical to sustainable water resource management and regional water security. This study investigated the water hydrochemistry of a wetland developed on diabase in the São Paulo Peripheral Depression, aiming to understand the hydrogeological role and evolution of this system within the context of the landscape, considering possible impacts of sugarcane management. Using a multi-metodológicay approach, including field techniques, laboratory analyses, hydrological modeling and interpretation of topographic data, information was obtained on the waterflow, its chemical composition and the interaction with the other water bodies in the region. Water level monitoring (shallow) revealed the seasonality and importance of rainwater as the main source of water input into the system. The physical and chemical analyzes classified the water as Sodium Bicarbonate, evidencing the seasonal influence, with peaks of bicarbonate and carbonate during the rains and average concentrations of sodium and chloride increasing at the end and during dry periods. There was an accumulation of salts in the upstream wells of the wetland, indicating that the region receives and retains salts from the surrounding cultivation. The strong and positive correlation between Na, HCO3+CO3, SO4 ions and electrical conductivity suggests that these ions are simultaneously released into the water due to the alteration of minerals present in the diabase and soil. Low calcium and magnesium contents suggest that the saprolite or rock are not the main sources of dissolved ions. The moderate and negative correlation between PO43- and Ca, and PO43- and Mg suggests that the phosphate concentration is conditioned by the adsorption and precipitation of calcium and magnesium phosphate. The flow analyzes allowed identifying the wetland as a flow lake, receiving upstream discharge and recharging downstream, with a preferential flow direction towards the East. The morphological analysis related the wetland with other structures in the landscape and evidenced its possible contribution to the source of the Córrego Santa Gertrudes. It is suggested that future studies quantify the residence time of water in the wetland and investigate its origin and evolution in detail.

Keywords: Wetlands; Hydrochemistry; Hydrology; Serra Geral Formation; Paulista Peripheral Depression.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação dos rios conforme sua posição frente as camadas geológicas. As letras em vermelhos significam: (C) consequentes; (S) subsequentes; (O) obsequentes; (R) resequentes; (I) insequentes. 16
Figura 2 – Disposição espacial dos principais tipos de padrões de drenagem. 16
Figura 3 – Esquema com as feições típicas de relevo cárstico. 17
Figura 4 – Esquema de depressões compostas. 19
Figura 5 – Localização da área de estudo destacada em vermelho. 25
Figura 6 – Mapa Geológico da região da área de estudo. 28
Figura 7 – Modelo de inversão de resistividade elétrica (inferior) em comparação com o esquema topográfico da área úmida (superior). 30
Figura 8 – Esquema de interpretação do modelo de inversão de resistividade elétrica e camadas geológicas (inferior) em comparação com o MDE da área úmida (superior). 30
Figura 9 - Mapa Hipsométrico da região da área de estudo. 31
Figura 10 - Mapa de Padrões de relevo da região da área de estudo. 32
Figura 11 – Mapa de feições de alagamento para a área de estudo. 33
Figura 12 – Delimitação da área de inundação e limite da área úmida (esquerda) e Modelo digital de elevação (MDE) da área de estudo e a delimitação da área úmida, sua área potencial de expansão e montante (direita). 34
Figura 13 – Fotografias da área de estudo (visando em direção ao Sul) destacando sua topografia ((a) corresponde a imagem fotografa em 08/2021 e (b) em 09/2021). As linhas tracejadas e setas brancas correspondem a delimitação da zona de inundação; as linhas pontilhadas amarelas correspondem a zona de potencial inundação e a linha tracejada vermelha delimita a zona montante. 35
Figura 14 - Precipitação na área de estudo (município de Cordeirópolis) para os meses de trabalho de campo. 36
Figura 15 - Mapa Pedológico da região da área de estudo. 37
Figura 16 – Fotografia da área de estudo (visando em direção a Sul) exibindo latossolo vermelho argiloso e desenvolvimento de vegetação. A linha tracejada e as setas brancas delimitam a zona de inundação. 38
Figura 17 – Mapa hidrográfico da região da área de estudo. 39
Figura 18 – Localização dos poços de monitoramento (PM) dentro da área de estudo. 41
Figura 19 – Fotografia do procedimento de esgotamento dos poços após instalados (PM-04). 42
Figura 20 – Média da carga hidráulica das amostras em cada campanha. As barras verdes representam os períodos de seca e as amarelas o período de cheia. 48
Figura 21 – Média de temperatura das amostras em cada campanha. As barras verdes representam os períodos de seca e as amarelas o período de cheia. 51
Figura 22 – Média da condutividade elétrica (Ce) das amostras em cada campanha. As barras verdes representam os períodos de seca e as amarelas o período de cheia. 52

Figura 23 – Média dos sólidos totais dissolvidos (STD) das amostras em cada campanha. As barras verdes representam os períodos de seca e as amarelas o período de cheia. 53
Figura 24 – Média de pH das amostras em cada campanha. As barras verdes representam os períodos de seca e as amarelas o período de cheia. 53
Figura 25 – Concentração médias dos constituintes da água por campanha. As barras verdes representam os períodos de seca e as amarelas o período de cheia. 56
Figura 26 – Concentração média dos maiores constituintes da água por campanha. As barras em tons verdes representam os períodos de seca e as em tons de amarelo, o período de cheia. 57
Figura 27 – Concentração dos íons constituintes da água por poço e campanha. ... 58
Figura 28 – Diagrama de Piper para as amostras analisadas. 58
Figura 29 – Classificação das águas do Aquífero Serra Geral, segundo o Diagrama de Piper. 59
Figura 30 – Classificação United States Salinity Laboratory (USSL). 60
Figura 31 – Coeficiente de correlação de Pearson entre os valores dos parâmetros físicos e químicos e concentrações de íons (considerando todas as campanhas). .. 63
Figura 32 – Coeficiente de correlação de Pearson entre as concentrações de íons (considerando todas as campanhas). 64
Figura 33 – Potenciometria e fluxo – 1ª Campanha – 23/09/2021. 66
Figura 34 – Potenciometria e fluxo – 2ª Campanha – 15/11/2021. 66
Figura 35 – Potenciometria e fluxo – 3ª Campanha – 26/01/2022. 67
Figura 36 – Potenciometria e fluxo – 4ª Campanha – 23/03/2022. 67
Figura 37 – Potenciometria e fluxo – 5ª Campanha – 27/05/2022. 67
Figura 38 – Potenciometria e fluxo – 6ª Campanha – 16/09/2022. 68
Figura 39 – Esquema de modelo de fluxo identificado na área de estudo. 68
Figura 40 – Modelos hidrológicos de fonte de água para áreas úmidas. 69
Figura 41 – Tipos de conexões hidrológicas em área úmidas e cursos d’água. 72
Figura 42 – Modelo digital de elevação (MDE) e perfis. 73
Figura 43 – Imagem de satélite com destaque as feições estudadas. 74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Divisão dos PIBS dos municípios de Cordeirópolis e santa Gertrudes. .26
Tabela 2 – Dados dos poços instalados na área de estudo. 42
Tabela 3 – Interpretação qualitativa adotada para os valores do coeficiente da correlação de Pearson. 46
Tabela 4 – Parâmetros Físicos e químicos medidos na área de estudo. 49
Tabela 5 – Análise estatística descritiva para os valores dos parâmetros Físicos e químicos medidos na área de estudo.....50
Tabela 6 – Resultados analíticos para as substâncias de interesse. 54
Tabela 7 – Análise estatística descritiva para os resultados analíticos. 55

SUMÁRIO

1. Introdução 13
2. Objetivos e relevância do tema 14
3. Revisão da literatura 15
3.1. Estado da arte e estudos sobre morfologia de depressões topográficas 15
3.2. Fluxo e composição das águas em paisagens com áreas úmidas isoladas 20
3.3. Conversão das áreas úmidas em sistemas antrópicos 22
3.4. As áreas úmidas como zonas de acúmulo de água da chuva 23
4. Área de estudo 24
4.1. Localização geográfica 25
4.2. Aspectos socioeconômicos e ambientais 26
4.3. Geologia 27
4.3.1. Unidades litoestratigráficas. 28
4.4. Aspectos geomorfológicos 30
4.5. Clima 35
4.6. Vegetação 36
4.7. Solos 37
4.8. Hidrografia 39
4.9. Hidrogeologia 40
5. Materiais e métodos 41
5.1. Instalação dos poços de monitoramento 41
5.2. Amostragem e análises hidroquímicas 43
5.3. Análise estatística 45
5.4. Potenciometria e sentido de fluxo das águas 46
6. Resultados e discussões 47
6.1. Campanhas de monitoramento e amostragem 47
6.1.1. Resultados *in situ* – parâmetros físicos e químicos 47
6.1.2. Resultados analíticos e hidroquímica 53
6.1.3. Correlações e interpretação 60
6.2. Potenciometria e sentido de fluxo das águas 65
6.3. Morfologia da depressão topográfica. 70
7. Conclusão 75
8. Referências 78
Anexo A – Descrição e morfologia do solo 91

1. INTRODUÇÃO

As áreas úmidas são ecossistemas importantes que desempenham um papel crucial na regulação do fluxo de água em uma bacia hidrográfica. Essas áreas podem armazenar água da chuva e contribuir para a recarga dos aquíferos e a manutenção dos cursos d'água em épocas de estiagem. A compreensão do fluxo das águas e da hidroquímica em áreas úmidas é fundamental para a gestão sustentável dos recursos hídricos e para garantir a segurança hídrica em uma região.

No contexto específico de áreas úmidas sobre diabásio, o conhecimento da hidrologia e da hidroquímica pode ser particularmente importante. O diabásio é uma rocha ígnea que tem uma composição mineralógica específica e que pode influenciar, em conjunto com o solo de sua alteração, as características químicas da água. A hidrologia e a hidroquímica dessas áreas também podem ser afetadas por fatores como a topografia, o clima, o uso do solo e a vegetação.

O estudo do fluxo das águas em áreas úmidas permite compreender a dinâmica hidrológica nesses ambientes, incluindo a recarga e a descarga de aquíferos, o escoamento superficial e a interação entre águas superficiais e subterrâneas. Além disso, é fundamental estudar a conectividade subsuperficial dessas áreas com os demais corpos hídricos da região, visto que estas podem funcionar como importantes zonas de transição e filtragem entre as águas superficiais e subterrâneas, permitindo a retenção e remoção de nutrientes, sedimentos e substâncias químicas antes que atinjam os corpos d'água adjacentes, como rios, lagos e aquíferos. A compreensão dessa conectividade hidrológica é crucial para avaliar os impactos de atividades humanas, como a agricultura intensiva e o desenvolvimento urbano, sobre a qualidade da água e para orientar a implementação de práticas de conservação e manejo adequadas.

A hidroquímica nas áreas úmidas, é outro aspecto de grande relevância, visto que a interação entre a água e a rocha pode resultar em processos de dissolução, alteração mineralógica e liberação de elementos químicos, além de também estar vulnerável ao uso da terra. O estudo da hidroquímica permite identificar a composição química das águas, avaliar sua qualidade e compreender os processos geoquímicos que ocorrem nesse ambiente, o que é essencial para a gestão adequada dos recursos hídricos, a proteção da saúde pública e a preservação desses ecossistemas.

Além das implicações para a gestão das águas, o estudo do fluxo das águas e da hidroquímica em áreas úmidas sobre diabásio também pode trazer contribuições significativas para a compreensão dos processos geológicos e geomorfológicos da região. A interação entre a rocha e a água ao longo do tempo e a estrutura do diabásio, como fraturas e falhas, podem desencadear processos de intemperismo e erosão, resultando em características geológicas e geomorfológicas distintas, como as depressões topográficas, fissuras e sistemas de drenagem subterrânea semelhantes a ambientes cársticos, ou pseudo-cársticos, visto que mesmo fora de um contexto de rochas essencialmente carbonáticas, o diabásio também sofre os processos de dissolução que originam tais formas no relevo, mesmo que em menor escala.

Por meio de uma abordagem multi-metodológica, que incluiu técnicas de campo, análises laboratoriais, modelagem hidrológica e interpretação de mapas e perfis topográficos, buscou-se obter informações sobre o fluxo de água, sua composição química e a interação dessas áreas com os demais corpos hídricos da região. Os resultados obtidos poderão embasar estratégias eficientes de gestão dos recursos hídricos para garantir a segurança hídrica a longo prazo, além de contribuir cientificamente para o melhor entendimento da dinâmica hidrogeológica das áreas úmidas.

2. OBJETIVOS E RELEVÂNCIA DO TEMA

Sabendo da importância das áreas úmidas e da escassez de conhecimento a respeito da dinâmica hidrogeológica nesses sistemas, principalmente na Depressão Periférica Paulista, este trabalho tem como objetivo analisar a hidroquímica de uma área úmida desenvolvida sobre diabásio (Fm. Serra Geral), e avaliar o papel hidrogeológico e a evolução desse sistema no contexto da paisagem em que está inserido, considerando possíveis impactos oriundos do uso da terra.

Na região, as pequenas áreas úmidas isoladas estão sendo destruídas desde meados dos anos 70 pela intensificação do uso da terra em áreas urbanas, mineração e agricultura intensiva. Por serem fortemente sensíveis ao uso da terra e às alterações climáticas que alteram a taxa de precipitação, a evapotranspiração e os hidroperíodos (MITSCH et al., 2009), os resultados da hidroquímica e potenciometria e a revisão e discussão a respeito da morfologia da área úmida fornecerão informações de base para possível subsídio a estudos de conservação e manejo hídrico e ecológico nessa região.

3. REVISÃO DA LITERATURA

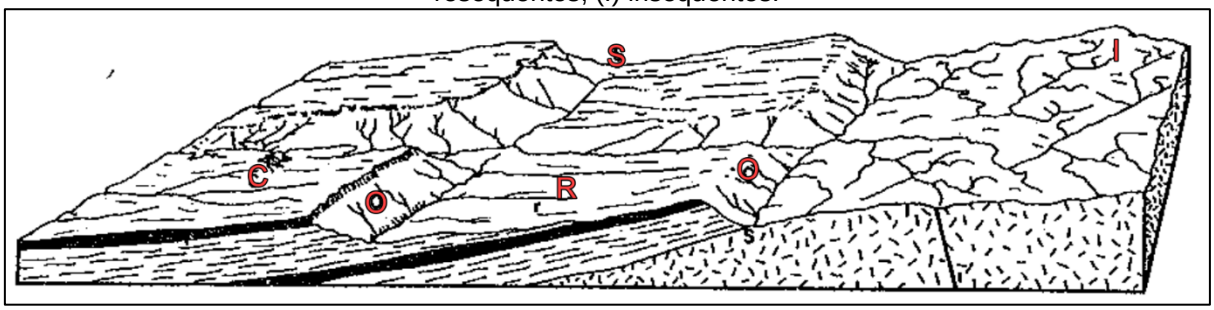
3.1. ESTADO DA ARTE E ESTUDOS SOBRE MORFOLOGIA DE DEPRESSÕES TOPOGRÁFICAS

Depressões topográfica alagadas ou não, são padrões de relevo que tradicionalmente são estudadas focando diferentes temas e interesses. Dentre eles, estudos sobre a gênese e seus processos de formação, natural ou antrópico, que ainda despertam atenção pela complexidade de interpretar formas comumente isoladas associadas com condições ambientais pretéritas que precisam ser reconstruídas (ETIENNE et al., 2011; FILIZOLA; BOULET, 1996; KOŁODYŃSKA-GAWRYSIAK; POESEN, 2017). Feições cársticas carbonáticas e pseudocársticas, similares às carbonáticas porém onde a dissolução é subordinada à processos físicos com perdas particuladas (*piping)* ou por lixiviação, podem surgir em afloramentos de quartzito, granito e basalto e, geralmente, são menores e pontuais (TRAVASSOS, 2019). Nesse trabalho, a área úmida (AU) é estudada como uma feição hidrogeomorfológica no sentido que possuem características comuns relacionadas com as suas formas, localização interfluvial nos topos das colinas, condições climáticas e uso do solo, embora apresentem alguma variação em termos de tamanho, hidroperíodos, substrato geológico e tipo de solo que podem influenciar a gênese e tipo das AUs (FURLAN et al., 2023). A fim se de identificar o padrão de relevo e estrutura da feição estudada pois elas reconhecidamente influenciam as funções ecossistêmicas e hidrológicas (SEMENIUK; SEMENIUK, 2011), foram avaliadas algumas abordagens sobre padrões de drenagem, formas de relevo, e desenvolvimento de feições cársticas disponíveis na literatura, aplicado os conhecimentos a região de estudo.

A configuração dos padrões de drenagem normalmente é a resposta do ajuste do sistema fluvial a uma ou várias características intrínsecas do ambiente de formação, sendo condicionadas por fraturas, falhas e características do substrato (CHRISTOFOLETTI, 1974) e se formam a partir de um conjunto de canais organizados num arranjo determinado por diferentes tipos de vertentes e controlados por desigualdades na resistência da superfície do substrato rochoso. Dessa forma, os padrões de drenagem podem refletir a estrutura original e/ou episódios sucessivos de modificação que a superfície sofreu, incluindo elevações, depressões, inclinações, deformações, dobramentos, falhamentos, dentre outros (ZERNITZ, 1932).

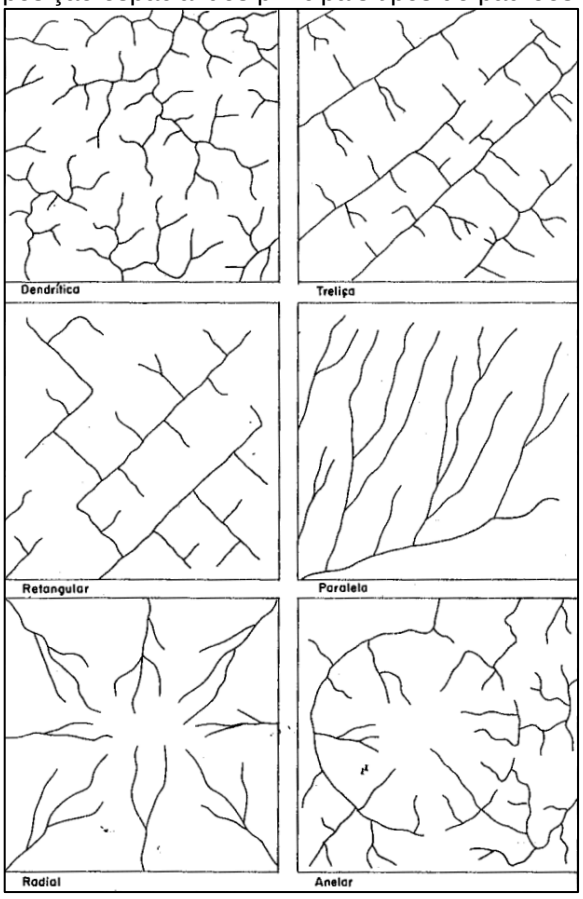
Sabendo-se que a disposição espacial dos cursos d'água pode evidenciar características morfogenéticas, morfotectônicas e morfoestruturais da área onde estão inseridas, identificar tais características, como o fluxo dos cursos d'água em relação a inclinação das camadas geológicas (Figura 1) e os padrões de drenagem na superfície (Figura 2), de uma região pode ser uma ferramenta importante para compreender a evolução da paisagem (CHRISTOFOLETTI, 1974).

Figura 1 – Classificação dos rios conforme sua posição frente as camadas geológicas. As letras em vermelhos significam: (C) consequentes; (S) subsequentes; (O) obsequentes; (R) resequentes; (I) insequentes.



Fonte: Modificado de Christofoletti (1974).

Figura 2 – Disposição espacial dos principais tipos de padrões de drenagem.



Fonte: Christofoletti (1974).

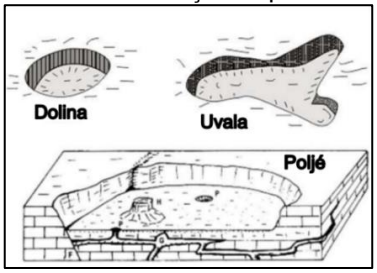
Sabendo-se a gênese e comportamento das drenagens em relação ao substrato geológico em que ocorre, é possível identificar possíveis causas de seu surgimento e entender melhor as estruturas que exercem controles geológicos e estruturais em uma paisagem. Ainda assim, para determinar causas do surgimento de depressões isoladas no relevo, pode-se considerar ainda mais fatores, como por exemplo a gênese de feições cársticas.

As formas de relevo cárstico originalmente são associadas a rochas calcárias devido aos processos de dissolução do carbonato de cálcio. No entanto, rochas com natureza diferente, como metamórficas, ígneas e até mesmo outras sedimentares, também podem apresentar processos de dissolução e/ou erosão interna e evolução morfológica semelhantes as rochas calcárias (MACIEL FILHO et al., 2013).

Guareschi e Nummer (2010) apresentam uma revisão dos conceitos de carste em rochas não calcárias e concluem que o conceito de carste se encontra em expansão e mostram que novas descobertas a respeito dos processos de dissolução são responsáveis por grandes variedades de formas de relevo em diferentes litologias, sejam rochas ígneas, vulcânicas ou metamórficas. PILÓ (2000) afirma que onde largas falhas estão presentes na rocha é comum encontrar dolinas e paredões alinhados ao longo delas, sendo a situação mais variável e menos expressiva do que a dissolução de cavernas. Entretanto, os autores afirmam que não se pode resumir tudo a feições cársticas, sendo necessário que algumas condições sejam atendidas para que assim se possa denominar o padrão de relevo, como por exemplo a forte atuação do intemperismo químico da rocha e a existência de formas resultantes típicas de processos geoquímicos de dissolução como dolinas e uvalas.

Algumas das formas típicas de feições de relevo cárstico tradicional abordadas por PILÓ (2000), que apresentam maio relevância para o entendimento da gênese das depressões topográficas são (Figura 3):

Figura 3 – Esquema com as feições típicas de relevo cárstico.

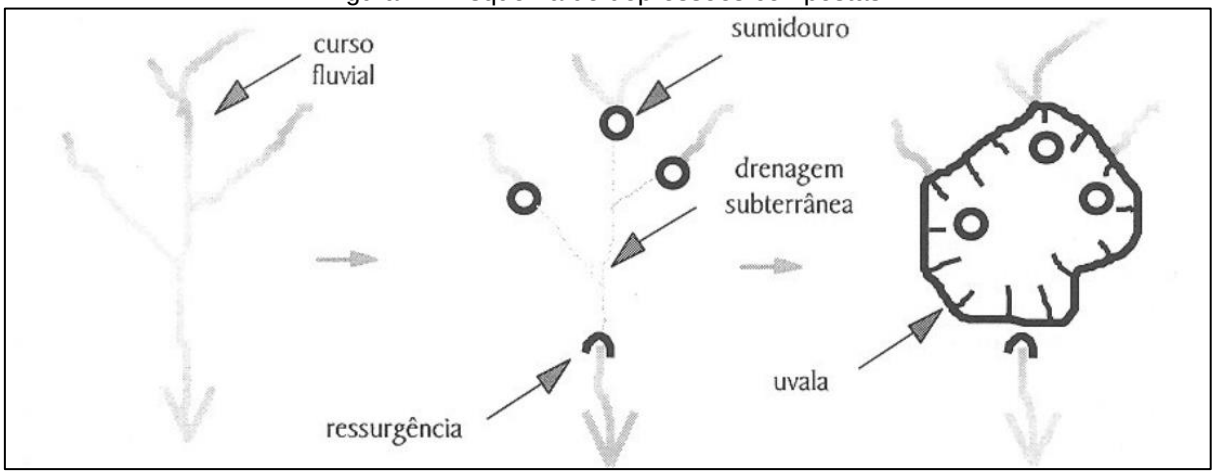


Fonte: Modificado de Bigarella et al. (1994).

- Dolinas, que são depressões circulares ou elípticas fechadas que podem atingir de poucos metros a centenas de metros de profundidade por várias centenas de metros de diâmetro. Seu processo inicial de formação está ligado à circulação da água em zonas de descontinuidades estruturais por onde começa o ataque químico (dissolução) normalmente em subsuperfície e físico (remoção de materiais), em terrenos que favorecem os fluxos superficiais de água. Pôde ainda ser dividida em 4 tipos morfogenéticos por Jennings (1985): dolinas de dissolução, de colapso ou abatimento, de colapso devido a carste subjascente e dolinas aluviais (ou de subsidência).
- Uvalas, derivam da tendência de que ocorra a união de duas ou mais dolinas, originando uma depressão com formato mais alongado, indicando a evolução morfológica do carste.

Vale destacar também, outro modelo de depressões compostas denominado de Valley sinks (WHITE, 1988), onde ocorre a transformação de vales fluviais em depressões fechadas. Sua fase inicial é caracterizada por uma drenagem superficial com freático raso onde pontos de absorção (sumidouros) se instalam na calha de drenagem, aprofundando o nível freático. Dessa forma, a drenagem superficial começaria a apresentar segmentos superficiais e subterrâneos e o desenvolvimento de dolinas próximas a drenagem, por último o desenvolvimento e ampliação dos divisores entre sumidouros e configuração de uvalas. Neste contexto, Karmann e Sadowski (1994), partindo de uma paisagem fluvial, identificaram a segmentação gradativa do sistema fluvial pela implantação de drenagem fechada (Figura 4), cujo desenvolvimento levou a formação de carste poligonal (paisagens onde as depressões fechadas de origem cársticas ocupam intensamente os espaços disponíveis das vertentes e formam uma rede celular de polígonos irregulares (WILLIAMS, 1971).

Figura 4 – Esquema de depressões compostas.



Fonte: Piló (2000).

Ainda sobre drenagens fechadas, as cabeceiras de drenagem se caracterizam pelo afloramento do nível freático e a ligação com um canal hidrográfico, compondo as áreas de nascentes que abastecem os rios, ou seja, pontos de ressurgência no modelo mencionado anteriormente.

Guareschi (2018) buscou compreender os processos morfogenéticos geradores das depressões fechadas e das cabeceiras de drenagem estudando a relação destas feições com a evolução do relevo. O autor buscou a integração entre diferentes variáveis envolvidas na gênese e evolução das feições, envolvendo as variáveis morfológicas, litológicas, estruturais, topográficas, e relativas ao perfil de intemperismo.

Em seu estudo de caso, (GUARESCHI, 2018) sugeriu a seguinte ordem de evolução:

i) Primeiramente surge na paisagem uma Depressão Fechada como consequência do intemperismo e erosão no cruzamento de fraturas;

ii) Com a continuidade do processo de alteração nas fraturas, a depressão tende ao alongamento no sentido do lineamento dominante, fato que promove a coalescência de duas ou mais feições do tipo Depressão Fechada;

iii) A união das depressões e a formação de um canal hidrográfico origina as Cabeceiras em Divisor, principalmente nas zonas menos resistente ao intemperismo, fato que promove a incisão e aprofundamento da feição;

iv) Em uma fase mais evoluída as Cabeceiras em Divisor tendem a redução nas taxas de incisão por um determinado período de tempo geológico,

> devido o front de intemperismo atingir uma camada mais resistente. É possível encontrar diversos trechos da drenagem com morfologia semicircular, alinhadas com depressões circulares ou alongadas nas extremidades das drenagens, permitindo considerar que a rede de drenagem se desenvolve e expande a partir da evolução das Depressões Fechadas em áreas com grande densidade de fraturamento.

Por fim, Guareschi (2018) conclui que o desenvolvimento das feições está associado a evolução do relevo em escala regional através da incisão e aprofundamento das cabeceiras de drenagem e formação de vales de cabeceira que se expandem para montante promovendo o recuo dos divisores. Sendo este processo associado as linhas de fraturas que oferecem menor resistência ao intemperismo.

3.2. FLUXO E COMPOSIÇÃO DAS ÁGUAS EM PAISAGENS COM ÁREAS ÚMIDAS ISOLADAS

O fluxo de água provenientes das partes altas das vertentes ou acelerado por fraturas no substrato rochoso que suportam aquíferos livres pode induzir ou acelerar processos de lixiviação geoquímica nos solos e, indiretamente, induzir a gênese de estruturas de abatimento (GABRIELLI; MCDONNELL; JARVIS, 2012). Neste caso, as áreas úmidas exercem função relevante no ciclo hidrológico e se caracterizam como um meio preferencial de transferência de água da chuva e do solo para os aquíferos e acomoda condições para a gerações de diversos tipos de fluxos preferenciais de água em subsuperfície (LIN et al., 2010). Nesse sentido, a configuração da superfície potenciométrica em um ambiente confinado ou pouco confinado é um método útil para compreender estruturas hidrogeológicas (FABBROCINO et al., 2022).

Fluxo preferencial é o caminho pelo qual a água se move em maior velocidade em uma fração de um meio poroso do que em sua matriz homogênea e pode ocorrer em superfície (*e.g.* escoamento superficial) ou subsuperfície (*e.g.* escoamento na interfaces solo-rocha, onde a rocha impermeável condiciona o escoamento lateral).

As áreas úmidas naturais são importantes componentes do ciclo hidrológico. Estoca água da chuva, influencia a recarga de aquífero, equilibra a vazão dos rios, os níveis de base e de fluxo e as inundações (MELTON et al., 2013). Estudos baseados em modelagens mostraram que as zonas úmidas influenciam diretamente os

processos hidrológicos na bacia hidrográfica, reduzindo o escoamento superficial, regulando o fluxo dos rios e atenuando os picos de fluxo - especialmente importantes nos extremos hidrometeorológicos causados por alterações climáticas (WU et al., 2022).

Devido à estreita interação entre as águas superficiais e subterrâneas, as zonas úmidas também exercem uma influência na qualidade da água, proporcionando um habitat natural com notáveis funções ecológicas e biogeoquímicas, caracterizando áreas com elevada relevância para a conservação e restauração (RUSSELL; BEAUCHAMP, 2017).

Adicionalmente, as áreas úmidas em geral, isoladas ou não, integram um continuum de conectividade hidrológica em uma bacia hidrográfica, mediando o transporte e a retenção de carbono (C), nitrogênio (N), fósforo (P), sedimentos e outros solutos através de uma grande variedade de processos hidrológicos e biogeoquímicos através desse continuum (MARTON et al., 2015). De acordo com os autores, sua presença na paisagem reduz o transporte desses elementos e materiais, incluindo os poluentes, para os segmentos à jusante dos sistemas aquáticos. Mesmo nos casos das pequenas depressões úmidas e isoladas, as trocas entre organismos, solutos e materiais com os cursos d`água e outros elementos da paisagem no entorno acontecem de forma sinérgica (TINER, 2003). Tais processos decorrem do fato que o isolamento se refere à presença de topografias mais elevadas no seu entorno e não pela inexistência de conexões hidrológicas, ecológicas e geográficas (TINER, 2003).

A conectividade é o fator que determina as interações e, na ausência de conexão visível entre os corpos hídricos superficiais, existe uma dificuldade maior de caracterizar a existência de conexão hidrológica subsuperficial entre a área úmida isolada e os cursos d`água próximos que inclui o movimento e a direção do fluxo (LEIBOWITZ; VINING, 2003). Na bacia hidrográfica, a conectividade hidrológica, ecológica e química é determinada pelas características físicas da paisagem, pelo clima, biota e ações antrópicas (LEIBOWITZ; VINING, 2003). A conexão ou desconexão com os rios (ou outros corpos hídricos) ocorrem de várias formas como, por exemplo, através do enchimento e extravasamento temporário (*fill and spill*) das águas em resposta aos eventos de precipitação, através de expansão, conexão e interação com outras áreas úmidas e lagos (*expansion, connecting and subsuming*)

que podem acontecer em longas distâncias, superior a 37 km ou, ainda, sem qualquer conexão visível (VANDERHOOF; ALEXANDER, 2016).

Por outro lado, é importante salientar que, como estudado por Dahlke et al. (2012), a existência de um fluxo de água preferencial, como no caso de encostas, pode transformar esses meios em áreas fonte para a dissipação de contaminantes, podendo atingir corpos d'água a jusante. A perturbação geralmente é causada por intervenções antrópicas que influenciam negativamente o ciclo da água, o estoque e a qualidade da água uma vez que as áreas úmidas tendem a responder a um novo padrão hidrológico possivelmente com menor nível de água superficial, tempo, frequência e duração das cheias e conectividade (DAVIDSON, 2014).

É importante ressaltar que a caracterização dos processos hidrológicos em uma paisagem requer uma série de informações básicas sobre convergência de fluxos, laterais e das trocas entre águas superficiais e aquífero, infiltração, absorção pelas raízes das plantas, acumulação e transmissividade da água do solo, interação entre o aquífero e os canais de drenagem e planícies de inundação e o uso da terra que, por sua vez, influenciam no ciclo biogeoqímico (CLARK et al., 2015).

Nesse sentido, a hidrologia pode ser aplicada ao estudo de áreas úmidas para explicar a dinâmica anual, sazonal e de curto prazo do nível d'água (hidropadrão e hidroperíodo) assim como fluxo das águas e potenciometria (JACKSON; THOMPSON; KOLKA, 2014).

3.3. CONVERSÃO DAS ÁREAS ÚMIDAS EM SISTEMAS ANTRÓPICOS

Apesar da importância, as áreas úmidas em todas as regiões da Terra, incluindo as turfeiras, estão sendo rapidamente convertidas em sistemas antrópicos (DAVIDSON; FINLAYSON, 2007). A drenagem e o avanço contínuo dos cultivos a partir das bordas geram impactos acumulativos que comprometem a resiliência do sistema solo-água-ecologia devido ao grande aporte de sedimentos, fertilizantes, pesticidas, desequilíbrio do ciclo hidrológico e emissão de gases de efeito estufa pela aceleração da decomposição da matéria orgânica. Caracteriza-se como uma situação de conflito porque as áreas úmidas são insubstituíveis em relação à proteção dos recursos hídricos e ciclagem da água nas bacias hidrográficas (ZOU et al., 2018).

Devido à dificuldade de medir todos os parâmetros ambientais no campo, modelos matemáticos (por exemplo o SWAT - *Soil and Water Assessment Tools*) (TAHMASEBI NASAB; SINGH; CHU, 2017), vem sendo usados para avaliar a dinâmica hidrológica ou as mudanças hidrológicas relacionadas aos impactos induzidos por ações humanas, sejam associadas às mudanças climáticas ou a conversão do uso da terra, ambos amplamente conhecidos por alterar o armazenamento, fluxo e o regime da água bem como a alteração crescente de materiais solúveis e insolúveis transportados, tais como sedimentos, partículas e matéria orgânica dissolvida, nutrientes, sal, elementos tóxicos inorgânicos e orgânicos (CUI et al., 2021).

A conversão das áreas úmidas em cultivo também acentua os impactos negativos relacionados ao manejo inadequado, visto a conexão desses sistemas com a água subsuperficial e mananciais. Nesse contexto, contaminantes provenientes de fertilizantes e agrotóxicos, como o nitrato, são mais passíveis de serem mobilizados para os mananciais, podendo acarretar riscos à saúde humana e ao meio ambiente (DE RESENDE, 2002).

Conciliar a agricultura com a manutenção dos recursos naturais, tornando a prática sustentável, é um dos grandes desafios da atualidade, e para isso, é necessário reconhecer os limites do uso da terra e realizar o manejo de forma sustentável, visto a correlação existente entre o aumento excessivo de nutrientes na água (MENEZES et al., 2014), principalmente NO_3^-, e o uso da terra ligado a agricultura.

Nesse sentido as áreas úmidas podem ser aliadas na preservação dos recursos hídricos, pois reconhecer e proteger essa interface solo-água e conciliá-la com o uso da terra mostra-se um meio de prevenir que áreas agrícolas continuem evoluindo para tornarem-se áreas fonte de contaminação de água.

3.4. AS ÁREAS ÚMIDAS COMO ZONAS DE ACÚMULO DE ÁGUA DA CHUVA

As áreas úmidas (AUs) naturais (*natural wetlands*) são ambientes que armazenam água da chuva e apresentam diferentes graus de umidade do solo por serem permanente ou temporariamente alagados. O acúmulo de água da chuva, o nível elevado do aquífero livre (freático) e os solos hidromórficos desferruginizados e

com alta concentração de matéria orgânica são algumas propriedades que caracterizam essas áreas (VEPRASKAS; LINDBO; LIN, 2012).

O padrão hidrológico das AUs pode ser a chave para compreender a hidrologia local e na bacia hidrográfica onde estão inseridas, em conjunto com a evolução dos solos, composição florística e estrutura da vegetação e a ciclagem biogeoquímica características desses ambientes. Os solos hidromórficos, desenvolvidos a partir do acúmulo de água e dinâmica hídrica particular, são considerados únicos por apresentarem propriedades físicas, químicas e morfológicas que os distinguem facilmente dos demais solos desenvolvidos em ambientes não alagados e, também por interagirem com a hidrologia local, controlam o fluxo da água e de solutos disponíveis, evidenciando a interdependência dessas duas variáveis (JACKSON; THOMPSON; KOLKA, 2014).

A interdependência entre a água e solo nesse meio é ainda mais evidente ao buscar entender as dinâmicas do armazenamento e disponibilidade hídrica, propriedade hidrológica dos solos que é controlada pela textura, estrutura, densidade, tamanho e distribuição dos poros e presença de matéria orgânica, assim como pela paisagem (topografia e geomorfologia) clima e vegetação em menor escala(GERIS et al., 2015). As propriedades do solo também influenciam suas relações hídricas, como capilaridade, infiltração e percolação, dessa forma, solos com teores altos de areia tendem a ter taxas de infiltração e percolação rápidas, boa aeração e baixa capacidade de armazenamento de água. Por outro lado, solos de textura mais fina tendem a ter taxas lentas de infiltração e percolação e aeração deficiente, embora solos de textura mais fina, mas com estrutura bem desenvolvida, também podem ter taxas de infiltração e percolação rápidas e boa aeração (JACKSON; THOMPSON; KOLKA, 2014).

4. ÁREA DE ESTUDO

Assim como detalhado nos próximos subcapítulos, durante a pesquisa foi observada característica singular a respeito da localização geográfica e divisão político-administrativa da feição de estudo e sua área de influência hidrográfica, visto que esta localiza-se no Município de Cordeirópolis (próximo à fronteira com o município de Santa Gertrudes) porém faz parte da bacia hidrográfica (sub-bacia Corumbataí) e possui proximidade e possível contribuição com a nascente do córrego

Santa Gertrudes, principal responsável pelo abastecimento hídrico da cidade de mesmo nome.

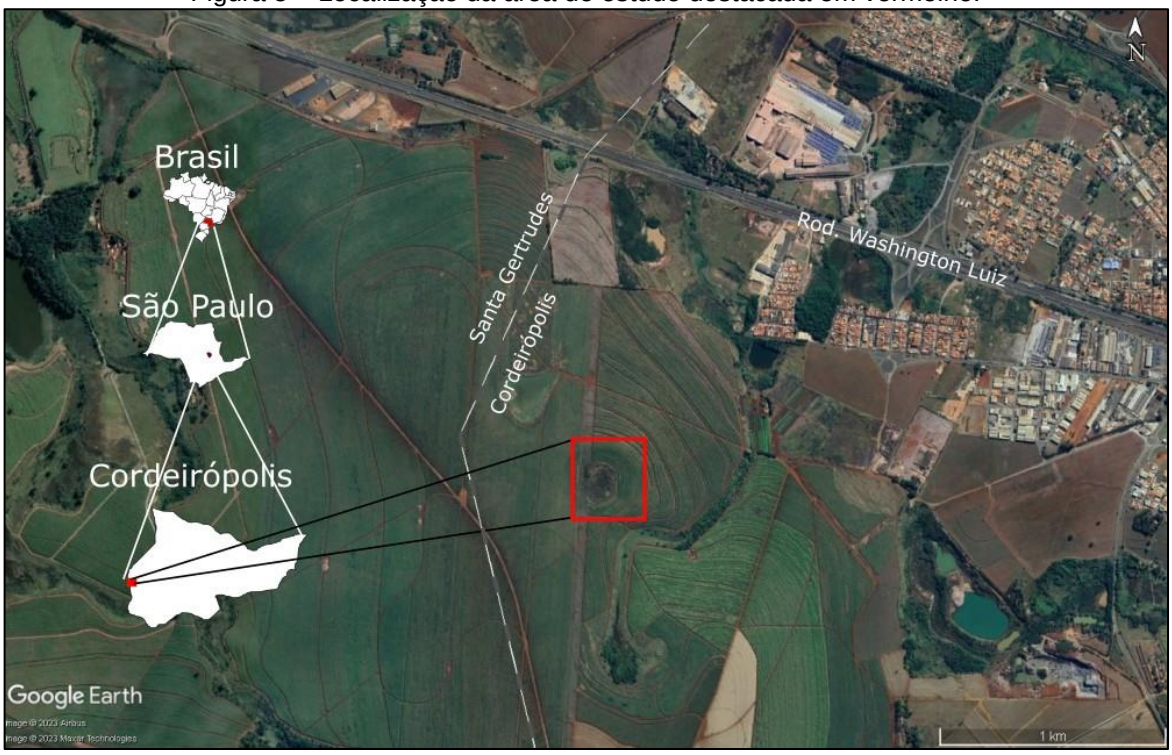
Devido a este contexto, em determinadas abordagens, serão consideradas como área de influência da feição de estudo tanto o município de Santa Gertrudes quanto de Cordeirópolis.

4.1. LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA

A área úmida isolada estudada (Figura 5) localiza-se na zona rural ao sudoeste do município de Cordeirópolis (22º 29’ 22” S, 47º 29’ 14” W a elevação média de 717m de altitude) e está inserida, geograficamente, na região intermediária de Campinas, uma das 11 regiões intermediárias do estado de São Paulo, e na região imediata de Limeira, uma das 4 cidades que compõem a região (IBGE, 2021).

O município é delimitado a norte por Araras, a leste por Limeira, ao sul por Iracemápolis e a oeste por Santa Gertrudes. O acesso a área pode ser realizado pela Rodovia Washington Luiz (SP-310), saída km 164 ainda no Município de Cordeirópolis, em direção a Santa Gertrudes.

Figura 5 – Localização da área de estudo destacada em vermelho.



Fonte: modificado de GOOGLE LLC (2022).

4.2. ASPECTOS SOCIOECONÔMICOS E AMBIENTAIS

Segundo o Censo Demográfico de 2020 (IBGE, 2020), o município de Cordeirópolis possuía 25.116 habitantes, sendo a 2ª mais populosa em sua região imediata (Região de Limeira). Já o município de Santa Gertrudes, com 21.634 habitantes é a segunda mais populosa de sua região imediata (Região de Rio Claro).

O Índice Paulista De Desenvolvimento Municipal (IPDM) de 2021 (SEADE, 2023) para os municípios é próximo, com Cordeirópolis aparecendo com o valor de 0,607, e Santa Gertrudes com 0,578, considerados muito alto e alto, respectivamente.

Conforme detalhado na Tabela 1, o setor econômico terciário (comércio e serviços) é o maior gerador de PIB para Cordeirópolis, seguido pelo setor secundário (indústrias) e em menor parte pelo setor primário (agropecuária, mineração, têxtil, entre outras atividades). Já para Santa Gertrudes o setor que maior contribui para o PIB é o secundário, seguido pelo primário e terciário.

Tabela 1 – Divisão dos PIBS dos municípios de Cordeirópolis e Santa Gertrudes.

	Impostos Líquidos de Subsídio	Primário	Secundário	Terciário
	Contribuição (%)			
Cordeirópolis	15,17%	1,66%	28,42%	54,74%
Santa Gertrudes	14,21%	0,64%	58,50%	26,65%

Fonte:(SEADE, 2020).

É importante destacar que ambos os municípios possuem relevância associada ao Polo Cerâmico de Santa Gertrudes (PCSG), complexo industrial responsável por produção cerâmica que abrange 8 municípios (Cordeirópolis, Araras, Ipeúna, Iracemápolis, Limeira, Piracicaba, Rio Claro e Santa Gertrudes) e movimenta a econômica regional em diversos setores como mineração, comércio de cerâmica, máquinas e equipamentos, pesquisa de base, entre outros (CHRISTOFOLETTI; MORENO, 2011). A economia da região também tem forte participação da agroindústria, com destaque para a sucroalcooleira com o cultivo de cana de açúcar correspondendo a 83,8% do PIB referente ao setor agropecuário em Cordeirópolis.

Neste contexto, o uso da terra como pastagem e cana-de-açúcar pode ser um gerador de conflito, visto a degradação ambiental, principalmente do solo, e supressão da vegetação nativa que acabam por vulnerabilizar nascentes, assorear córregos e rios e diminuir do potencial de armazenamento de água através da sua compactação

devido as práticas de manejo intensivo, impactando fortemente a disponibilidade hídrica demandada por todos os setores econômicos e população.

As áreas úmidas são regiões fortemente afetadas direta ou indiretamente por essas práticas, pois é comum sua localização geográfica em áreas não habitadas que são incorporadas por práticas agrícolas ou de mineração que acabam por destruir ou descaracterizar esses ecossistemas que são de grande importância para disponibilidade hídrica. Nessas condições, as áreas úmidas ficam vulneráveis à contaminação da agricultura (fosfato, nitrato, metais pesados e hidrocarbonetos), principalmente de cana-de-açúcar e às mudanças no nível da água causadas por fossas de mineração de argila da região que podem comprometer o sistema de recarga do freático e aquíferos e o fluxo para os rios (JUNQUEIRA, 2021).

4.3. GEOLOGIA

A área de estudo está inserida no contexto geológico da Bacia Sedimentar do Paraná, uma das quatro sinéclises brasileiras, juntamente com as bacias do Solimões, Amazonas e Parnaíba, que representam sucessões sedimentares intracontinentais paleozóicas contidas no interior da Plataforma Sul-Americana (ALMEIDA et al., 1981).

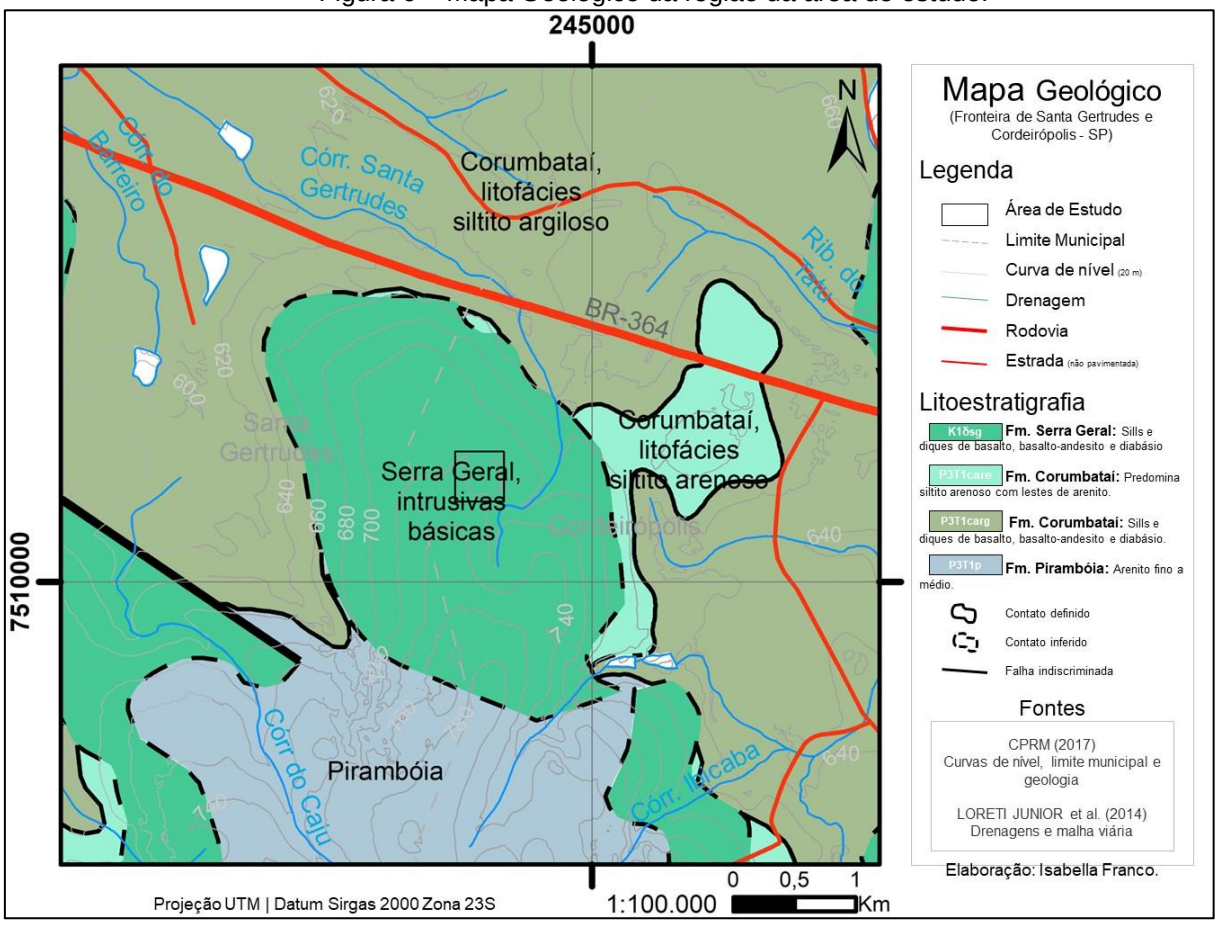
Trata-se de uma ampla depressão deposicional da América do Sul que inclui porções do Brasil meridional, Paraguai oriental, nordeste da Argentina e norte do Uruguai, cobrindo cerca de 1,5 milhão de quilômetros quadrados. Possui caráter intracratônico e é preenchida com aproximadamente 5.000 metros de sedimentos paleozoicos, mesozoicos, vulcânicas básicas a ácidas, e coberturas cenozoicas (MILANI et al., 2007; SCHNEIDER et al., 1974).

Quanto à disposição lito-cronoestratigráfica, a mais recente divisão estratigráfica regional da bacia foi proposta por Milani et al. (2007) que reconheceu seis Supersequências delimitadas por discordâncias erosivas de ampla escala: Supersequência do Rio Avaí (Ordoviciano-Siluriano), Paraná (Devoniano), Gondwana I (Carbonífero-Eotriássico), Gondwana II (Meso a Neotriássico), Gondwana III (Neojurássico-Eocretáceo) e Bauru (Neocretáceo). As três primeiras Supersequências são caracterizadas por sucessões sedimentares que definem ciclos transgressivos e regressivos relacionados a variações no nível eustático da Era Paleozóica; as demais correspondem a pacotes de sedimentos continentais com rochas ígneas e vulcânicas associadas.

4.3.1. Unidades Litoestratigráficas.

A área de estudo, está inserida no contexto da Supersequência Gondwana I e III, descrita por Milani et al. (2007), sendo que localmente aflora apenas a unidade estratigráfica Serra Geral (Gondwana III), majoritariamente como solo residual, sendo que em subsuperfície também ocorre a Formação Corumbataí (Gondwana I) e a Formação Pirambóia ocorre apenas nas proximidades (Figura 6).

Figura 6 – Mapa Geológico da região da área de estudo.



Fonte: elaborado pela autora.

A Formação Corumbataí é a principal fonte da matéria-prima cerâmica do PCSG e tem ocorrência expressiva na região de Cordeirópolis. Schneider et al. (1974) aponta que sua litologia seja constituída argilitos, folhelhos e siltitos de cores escuro-acinzentados com intercalações carbonáticas e camadas de arenitos muito finos, com espessura em torno de 100m na área de estudo. O ambiente deposicional é lagunar associado a planícies de maré (SOARES et al., 1980). O contato (inferior) com a

Formação Irati é concordante e o contato (superior) com a Formação Pirambóia é discordante. Idade definida como Permiano Superior.

A Formação Serra Geral é representada por diques e sills de diabásio, os quais estão, em grande parte, intercalados com camadas arenosas na porção basal (SOARES; LANDIM, 1973). São comuns a presença de falhas e fraturamentos decorrentes das intrusões magmáticas em unidades subjacentes e o seu posterior resfriamento. Essas estruturas são importantes para a investigação da gênese uma depressão topográfica, visto que fraturas e falhas tendem a acelerar o intemperismo químico (aumento da superfície de contato com a água) e induzir abatimentos no substrato rochoso.

Localmente, a Formação Serra Geral é a unidade que tem maior influência na composição dos solos e águas da área de estudo, por esta dar origem, através do intemperismo físico e químico, ao solo da área e por ser o substrato em que a água percola e reside. Sua petrologia é composta em sua maioria por basaltos toleíticos e andesitos basálticos (MILANI et al., 2007) de coloração cinza a preta. Na região da área de estudo, de acordo com Machado et al. (2005), o diabásio da Formação Serra Geral é composto, em média, por:

- 40% de plagioclásio - labradorita a oligoclásio - $(Na,Ca)Al(Si,Al)Si_2O_8$);
- 23% de piroxênio - augita - $Ca(Mg,Fe,Al)(Al,Si)_2O_6$;
- 4% de piroxênio - pigeonita - $(Mg,Fe^{2+},Ca)(Mg,Fe^{2+})Si_2O_6$;
- 7% de opacos - magnetita (Fe_3O_4), ilmenita ($FeTiO_3$) e sulfetos;
- 0,5% de olivina - $(Mg,Fe)_2SiO_4$;
- 25,5% de mesostase quartzo-feldspática e material vítreo.

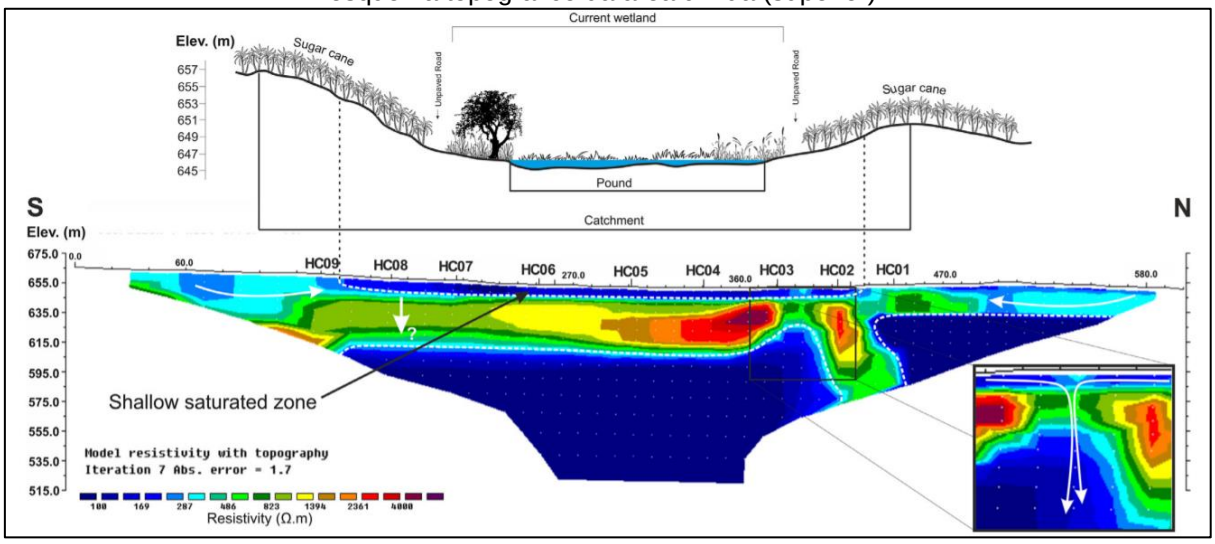
Localmente, as unidades que embasam a área de estudo foram investigadas por Casagrande et al. (2021), que com base no modelo de inversão de resistividade elétrica 2D (Figura 7), caracterizaram três zonas principais distintas, que foram definidas de acordo com as anomalias de alto contraste e sua extensão lateral / vertical (Figura 8).

O primeiro nível de leitura foi em uma profundidade de cerca de 3 m, interpretada pelos autores como o pacote referente ao solo.

Logo abaixo, os autores identificaram uma intrusão máfica da Formação Serra Geral que corresponde a uma soleira de 45 m de espessura com extensão lateral com um provável dique da mesma unidade geológica.

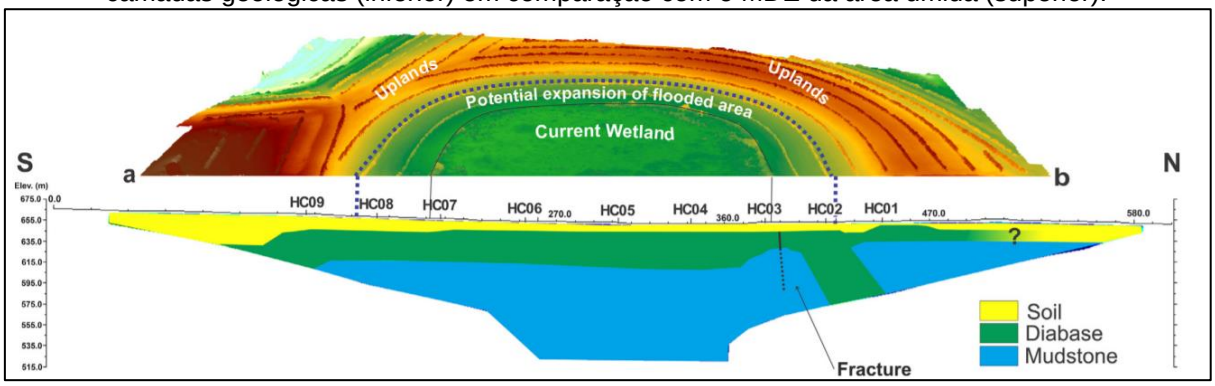
A terceira e última zona foi definida pelos autores como as rochas sedimentares saturadas e de granulação fina da Formação Corumbataí, abaixo da Formação Serra Geral.

Figura 7 – Modelo de inversão de resistividade elétrica (inferior) em comparação com o esquema topográfico da área úmida (superior).



Fonte: Casagrande et al. (2021).

Figura 8 – Esquema de interpretação do modelo de inversão de resistividade elétrica e camadas geológicas (inferior) em comparação com o MDE da área úmida (superior).



Fonte: Casagrande et al. (2021).

4.4. ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS

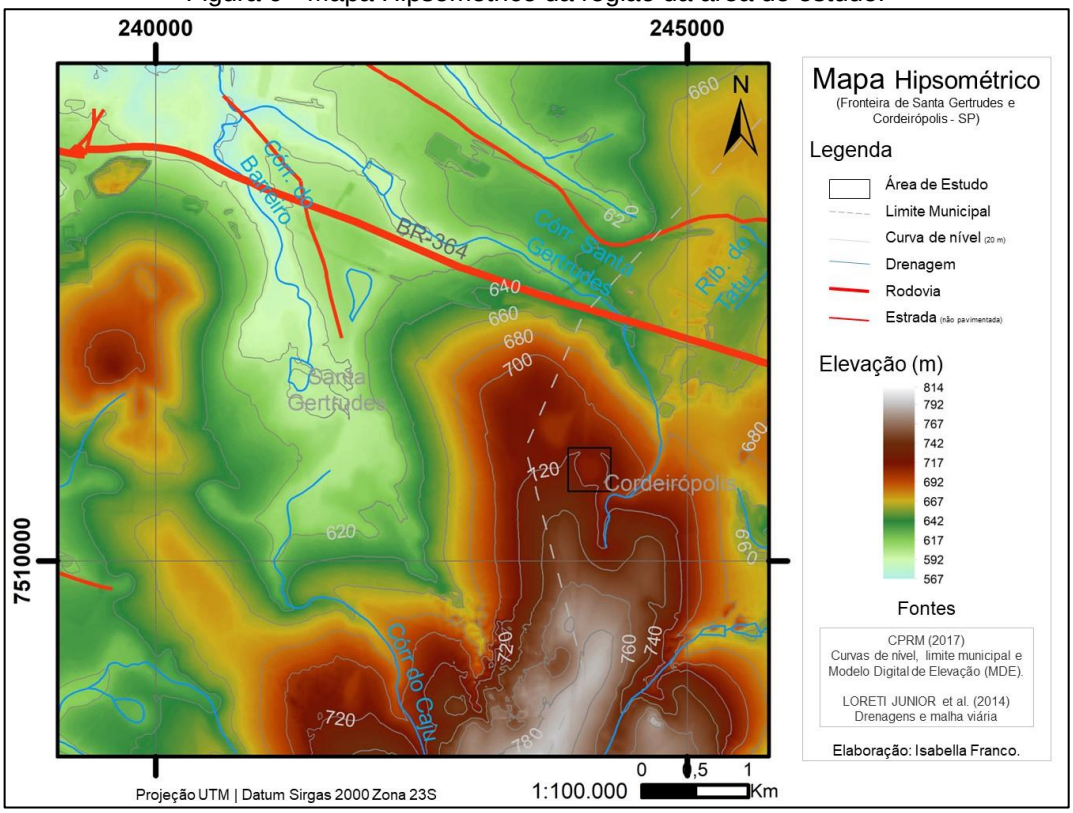
Na divisão geomorfológica do Estado de São Paulo, conforme (ALMEIDA, 2018), a Bacia do Paraná é classificada em províncias com uma conseguinte divisão em zonas, se pautando sobre aspectos descritivos e genéticos do relevo. O relevo do

interior do estado de São Paulo subdivide-se nas seguintes províncias geomorfológicas: Planalto Atlântico, Província Costeira, Depressão Periférica, Cuestas Basálticas e Planalto Ocidental.

A área de estudo está inserida na Província Geomorfológica Ocidental, denominada “Depressão Periférica Paulista”, dentro da Zona do Médio Tietê (ALMEIDA et al., 1981). Esse contexto está situado entre estruturas topográficas sobressalentes, do Planalto Atlântico e das cristas das Cuestas basálticas. Segundo (ROSS, 1990), este compartimento está esculpido nos sedimentos paleo-mesozóicos da Bacia do Paraná, apresentando altitudes que variam entre 600 e 750 metros (Figura 9), com encostas e regiões topograficamente mais altas frequentemente associadas as rochas básicas dos diques e sills da Formação Serra Geral.

A imagem do modelo digital de elevação apresentado na Figura 9 evidencia o isolamento topográfico da feição de estudo, no segmento de meia encosta, e sua possível relação com a nascente do córrego Santa Gertrudes, visto a próxima localização desta a um divisor de águas (região em cor cinza/branca) o qual a isola topograficamente no domínio do referido córrego.

Figura 9 - Mapa Hipsométrico da região da área de estudo.

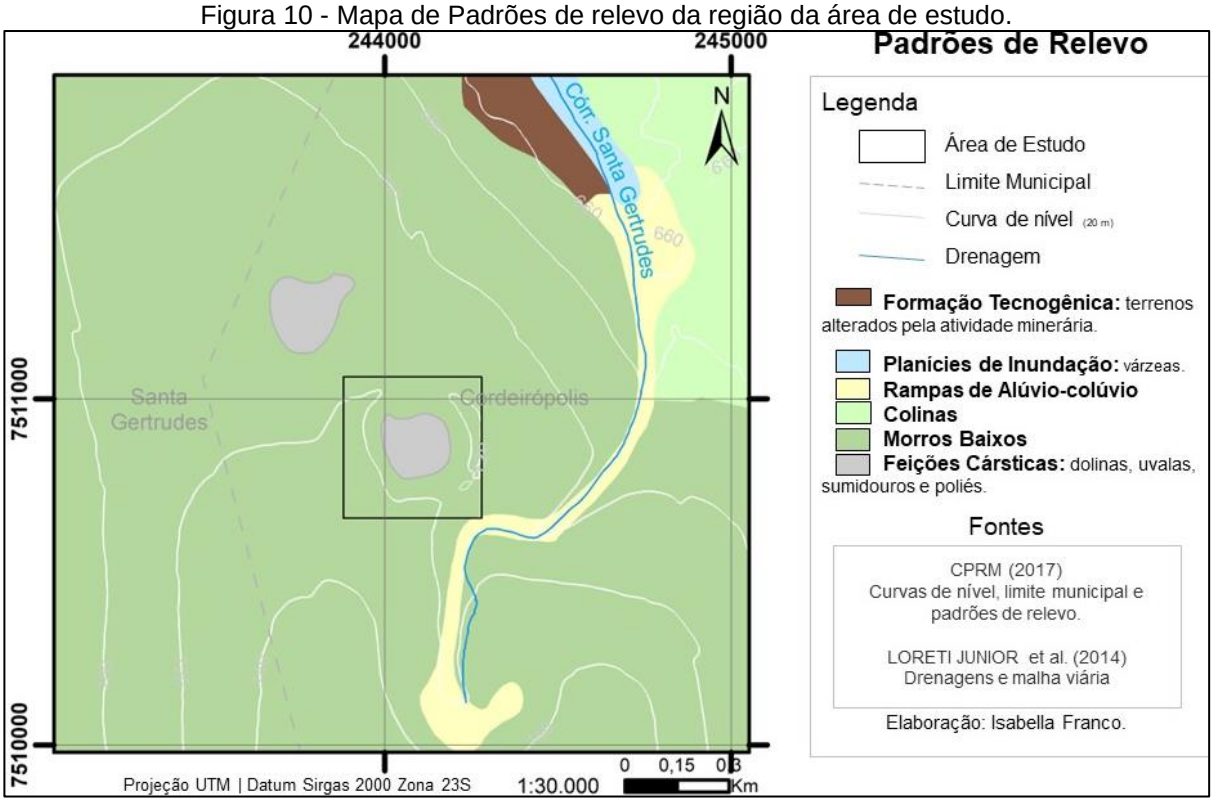


Fonte: elaborado pela autora.

Conforme Almeida (2018), o relevo na área é pouco acidentado (Figura 10), predominando colinas baixas, de formas suavizadas que raramente ultrapassam desníveis de 200 m e declividade ondulada (9 a 36%), apresentando drenagem dendrítica que aflora em arenitos quando estes alcançam o nível de base, ou quando o substrato é impermeável (diabásios da Fm. Serra Geral). Também são comuns na região de estudo rampas de alúvio-colúvio nas encostas das regiões topograficamente mais elevadas, onde localizam-se as nascentes dos principais córregos.

CPRM (2017) identifica no relevo da região a presença recorrente de áreas isoladas topograficamente mais baixas e de formato ovalado, a qual está inclusa a feição de estudo, que são caracterizadas como feições cársticas, podendo ser dolinas, uvalas, sumidouros ou poliés. Embora tais denominações possam não refletir integralmente a gênese da área de estudo, é possível aproveitar essas interpretações como um ponto de partida para gerar discussões que motivem a investigação da gênese dessas formas de relevo, tendo sido também destacada uma área úmida similar próxima, a nordeste, que obteve a mesma classificação (Figura 10).

Figura 10 - Mapa de Padrões de relevo da região da área de estudo.

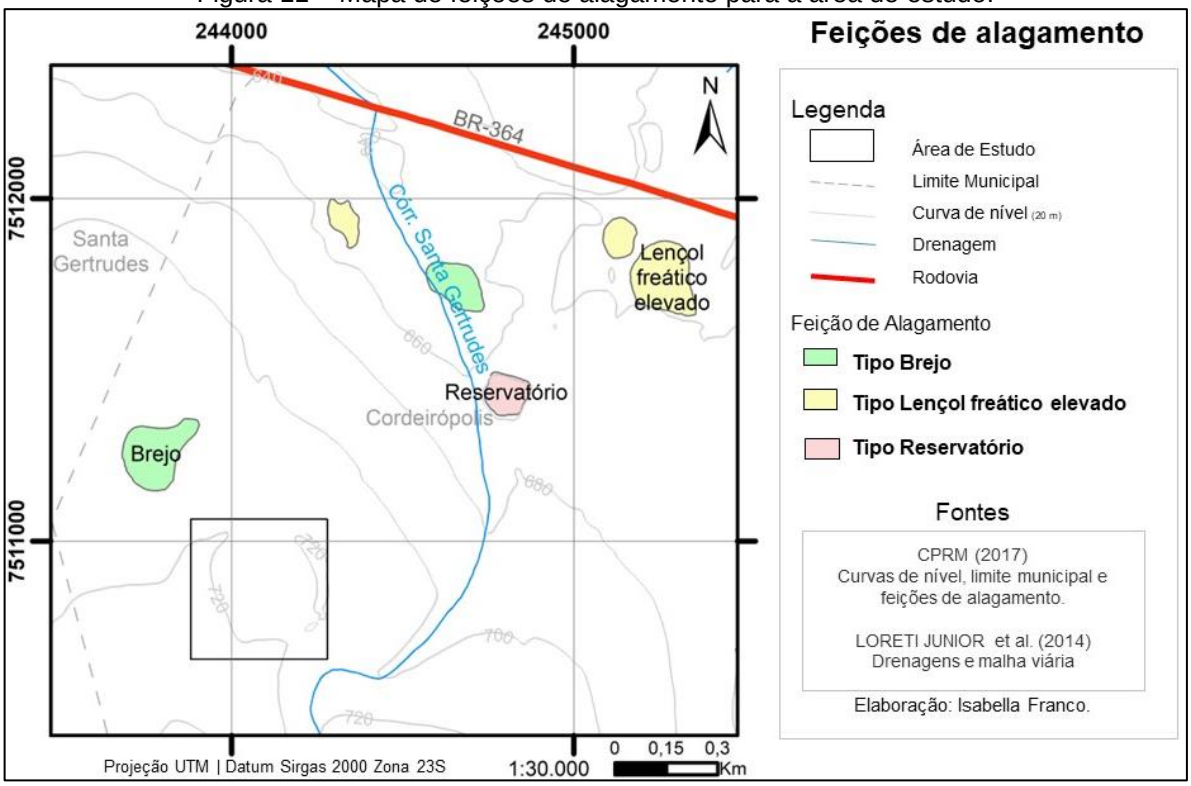


Fonte: elaborado pela autora.

A AU de estudo deste trabalho não é mencionada, porém são feitas referências a AU's próximas, a noroeste e nordeste da área (Figura 11). A descrição atribuída a AU mais próxima é "Tipo Brejo" e as demais aparecem como "Tipo Brejo", "Tipo Lençol freático elevado" ou "Tipo Reservatório".

De acordo com CPRM (2017) a AU mais próxima a nordeste é descrita como: "Pequena depressão fechada com lâmina d'água rasa formando lagos temporários sobre latossolo sustentado por basalto; no entorno cultura de cana-de-açúcar. Região alta, de morros baixos e com diversos blocos de basalto. As depressões têm áreas brejosas e são fechadas. Isto mostra que a água deve ser meteórica ou subterrânea. Feições cársticas.". Onde são levantadas questões a respeito da gênese e dinâmica dessas áreas.

Figura 11 – Mapa de feições de alagamento para a área de estudo.



Fonte: elaborado pela autora.

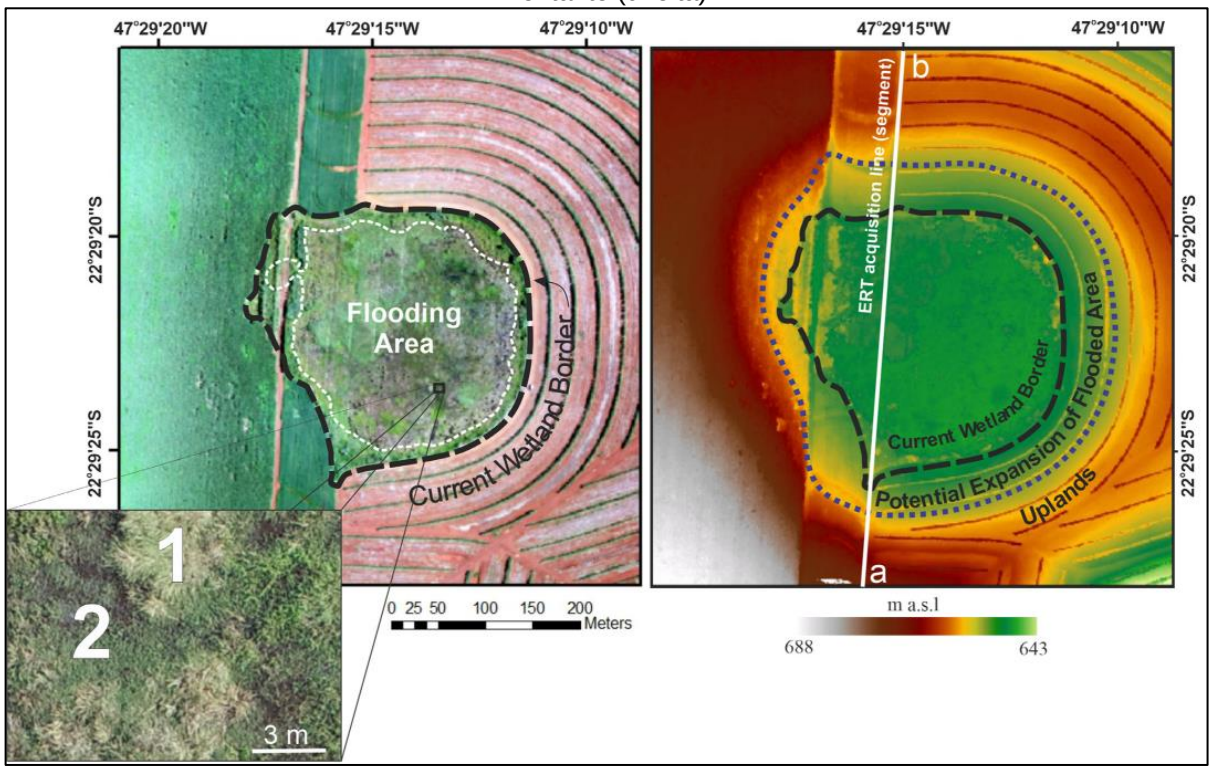
Em escala local, Casagrande et al. (2021) apresenta o Modelo Digital de Elevação (MDE) onde os autores caracterizaram três compartimentos superficiais na paisagem: i) Montante, ii) Área úmida, e iii) potencial expansão da área de inundação (Figura 12).

A zona (i) refere-se à zona externa que delimita a área de contribuição do fluxo para o interior da área úmida. Sua principal característica é o domínio da agricultura intensiva de cana-de-açúcar e estradas vicinais, na porção oeste do MDE, enquanto na porção leste, o solo exposto e as linhas semicirculares de manejo de cana-de-açúcar pós-colheita.

A zona (ii) refere-se à porção mais baixa do relevo, onde predomina o solo hidromórfico e vegetação gramínea característica, por sofrer influência direta da concentração de água sub e superficial.

A zona (iii) é toda a região que compreende a depressão topográfica, onde a água de escoamento pode potencialmente se concentrar.

Figura 12 – Delimitação da área de inundação e limite da área úmida (esquerda) e Modelo digital de elevação (MDE) da área de estudo e a delimitação da área úmida, sua área potencial de expansão e montante (direita).



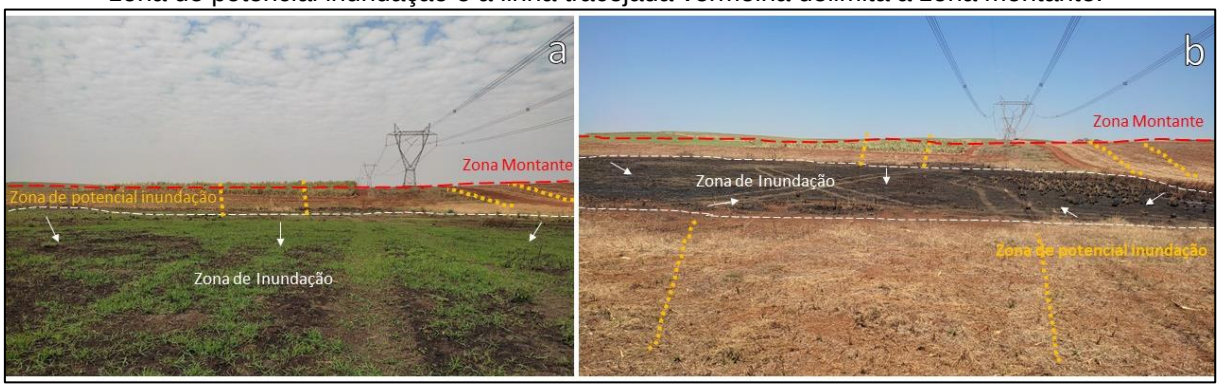
Fonte: Casagrande et al. (2021).

Os autores destacam a topografia bem definida da depressão na paisagem sem qualquer ligação superficial com outros corpos d'água, o que configura uma característica essencial de uma área úmida isolada.

Com destacado na Figura 13 é possível observar o relevo da área de estudo em perspectiva, na Figura 13a (agosto/2021), fotografia realizada após a área úmida

ser queimada, zona de inundação (linha tracejada e setas brancas) aparece com a vegetação queimada, zona de potencial inundação (linhas pontilhadas amarelas) com vegetação seca e zona a montante exibe cultivo de cana-de-açúcar (delimitada pela linha tracejada vermelha). Já na Figura 13b (setembro/2021) a zona de inundação (linha tracejada e setas brancas) aparece com vegetação verde sadia e ainda mostra o solo escurecido pela queimada; zona de potencial inundação, vegetação seca (linha pontilhada amarela); e zona de montante, cultivo de cana-de-açúcar crescido (linha tracejada vermelha).

Figura 13 – Fotografias da área de estudo (visando em direção ao Sul) destacando sua topografia ((a) corresponde a imagem fotografa em 08/2021 e (b) em 09/2021). As linhas tracejadas e setas brancas correspondem a delimitação da zona de inundação; as linhas pontilhadas amarelas correspondem a zona de potencial inundação e a linha tracejada vermelha delimita a zona montante.



Fonte: elaborado pela autora.

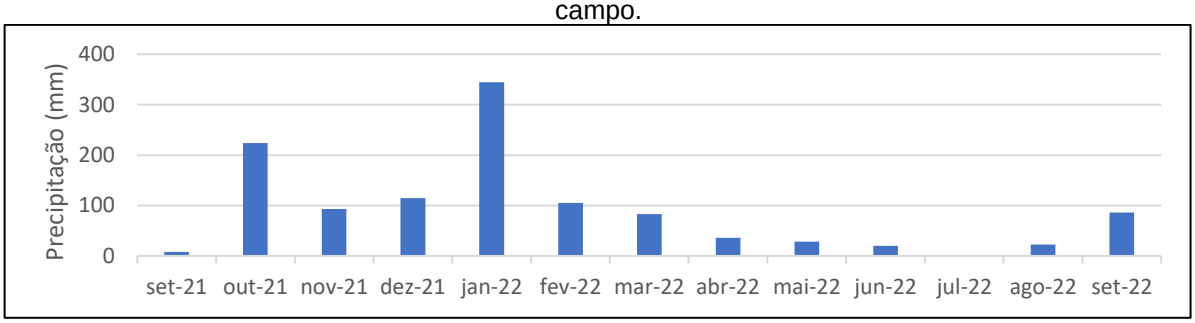
4.5. CLIMA

O clima da região é considerado subtropical úmido com verões quentes (Cwa), de acordo com a revisão de Alvares et al. (2013) segundo a classificação de Koppen (1931) para o Brasil, apresentando duas estações bem definidas, seca nos meses mais frios (abril a setembro) e chuvosa nos meses mais quentes (outubro a março). Nos períodos secos e frios as temperaturas variam de -3º a 18ºC e a precipitação mensal chega a ser menor que 40mm, já nos períodos úmidos e quentes as temperaturas são maiores que 22°C e a precipitação mensal é mais de 10 (dez) vezes maior que nos períodos secos (ALVARES et al., 2013). A estiagem estende-se de março a setembro, com apenas 20% das chuvas anuais e as massas de ar tropicais e equatoriais predominam em mais da metade do ano, trazendo mais de 80% das chuvas anuais.

Durante os trabalhos de campo, amostragens e medições de nível d'água, o maior registro de precipitação no município de Cordeirópolis foi no mês de janeiro de

2022 (344,17 mm) e a menor em julho do mesmo ano, não havendo precipitação (CIIAGRO, 2022) (Figura 14).

Figura 14 - Precipitação na área de estudo (município de Cordeirópolis) para os meses de trabalho de campo.



Fonte: CIIAGRO, 2022.

4.6. VEGETAÇÃO

Na região da área de estudo, prevalece vegetação dos tipos Savana (Cerrado) e Floresta Estacional Semidecidual, segundo classificação de Veloso e Goes Filho (1982).

A Floresta Estacional Semidecidual, constitui a vegetação típica do Bioma Mata Atlântica, estando condicionada a sazonalidade climática: uma tropical, com época de intensas chuvas de verão seguidas de estiagens e uma subtropical, sem período seco, mas com seca fisiológica provocada pelo intenso frio de inverno, com temperaturas médias inferiores a 15°C, quando há perda de 20 a 50% das folhas.

A Savana (Cerrado) é considerada uma vegetação xeromorfa, que ocorre sob distintos tipos de clima. Reveste solos lixiviados aluminizados, com ocorrência em toda Zona Neotropical e no Brasil Central. Na região de estudo ocorre o subgrupo Savana Arborizada, caracterizado como formação natural ou antrópica.

Apesar de o setor econômico primário ter o menor impacto no PIB dos municípios estudados, é importante destacar que a vegetação primária na região vem sendo substituída por áreas de atividade agropecuárias, predominando o plantio de cana-de-açúcar e áreas com reflorestamento de eucalipto (LORETI JUNIOR; SARDOU FILHO; CALTABELOTI, 2014).

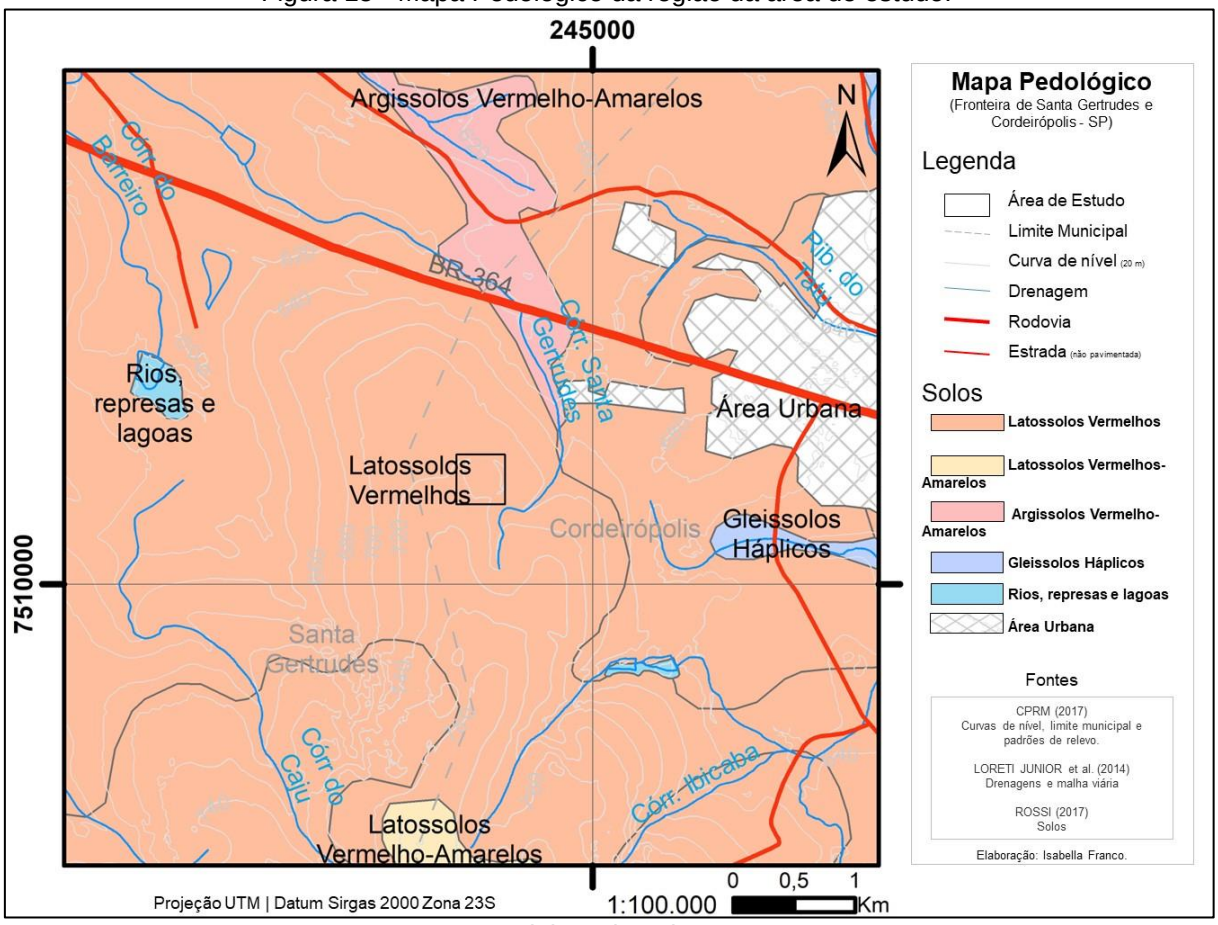
No interior da área úmida de estudo, ocorre vegetação endémica de gramíneas e demais espécies exóticas (*e.g. Brachiaria*) (CASAGRANDE et al., 2021), ainda não estudadas localmente. É comum a essas áreas possuírem biodiversidade rica, devido ao desenvolvimento de espécies com afinidade à água.

Durante trabalhos de campo já foi observada a vegetação queimada e tentativas de plantio de soja no interior da área úmida.

4.7. SOLOS

Segundo Rossi (2017), o solo com maior expressão na região de estudo e que ocorre localmente (Figura 15), é classificado como Latossolo Vermelho, ocorrendo também, em escala regional, o Nitossolo vermelho, Argilossolo Vermelho-Amarelo, Neossolo Litólico e Gleissolo Háplico.

Figura 15 - Mapa Pedológico da região da área de estudo.



Fonte: elaborado pela autora.

O Latossolo vermelho (LV10), proveniente da alteração *in situ* do diabásio, ocorre localmente (Figura 16) e é caracterizado como distroférrico/eutroférrico típico, com horizonte A moderado e chernozêmico, textura argilosa a muito argilosa, ocorrendo em fases de relevo ondulado a suave ondulado (ROSSI, 2017).

Figura 16 – Fotografia da área de estudo (visando em direção a Sul) exibindo latossolo vermelho argiloso e desenvolvimento de vegetação. A linha tracejada e as setas brancas delimitam a zona de inundação.

Fonte: elaborado pela autora.

A composição mineralógica do solo de alteração *in situ* do diabásio das amostras coletadas nos poços de monitoramento se repete e são caracterizadas pela ocorrência de caulinita/haloisita, quartzo, gibbsita, goethita, hematita, cristobalita, anatásio, clorita-serpentina, ilmenita, montmorilonita-clorita e nontronita (CASAGRANDE, 2023). A gibbsita foi encontrada na superfície do solo, indicando a possibilidade de ter sido depositada como resultado da erosão hídrica da encosta. Caulinita é o argilomineral mais abundante inclusive nos solos do entorno desenvolvidos sobre diabásio (CLEMENTE; MARCONI, 1994).

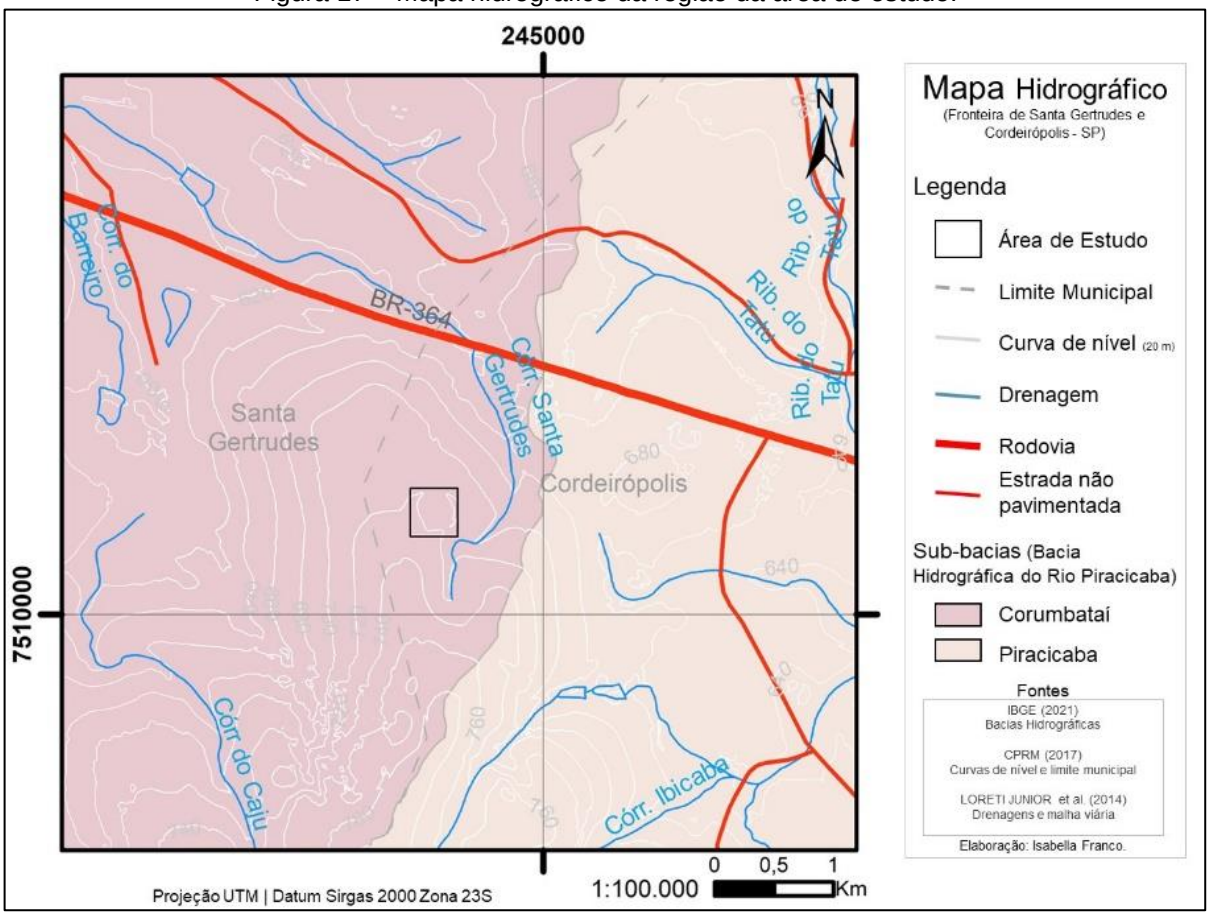
Pelo carácter da área de estudo, feição parcialmente ou permanentemente alagada, também podem ocorrer solos hidromórficos como gleissolos em seu interior em períodos de alagamento (CASAGRANDE et al., 2021).

4.8. HIDROGRAFIA

A área de estudos está inserida na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos 05 (UGHRI 05) (Figura 17), umas das 22 subdivisões do estado de São Paulo, denominada Bacia do Piracicaba / Capivari / Jundiaí (Comitê de Bacias Hidrográficas CBH-PCJ). O estudo da hidrografia das Bacias PCJ indicou uma área total de drenagem superficial de, aproximadamente, 15.377 km², sendo 92,45% na porção paulista e 7,55% na porção mineira. Nesta área de drenagem, estão inseridas três bacias hidrográficas: Bacia do Rio Capivari (1.568 km²), Bacia do Rio Jundiaí (1.154 km²) e Bacia do Rio Piracicaba (12.655 km²) (PCJ, 2020).

Neste contexto, o município em que área de estudo está geograficamente localizada, Cordeirópolis, está inserido no domínio da Bacia do Rio Piracicaba que é subdividida em 3 sub-bacias: (1) Corumbataí a extremo oeste; (2) Piracicaba na porção central; (3) Jaguari na porção centro-leste (PCJ, 2020).

Figura 17 – Mapa hidrográfico da região da área de estudo.



Fonte: elaborado pela autora.

Entretanto, a feição de estudo está inserida na sub-bacia Corumbataí (Figura 17), próximo a nascente do Córrego Santa Gertrudes, afluente do Rio Corumbataí que, segundo (CÂMARA MUNICIPAL DE SANTA GERTRUDES, 2023), é o principal responsável pelo abastecimento de água do município em conjunto com mais três poços de captação de água subterrânea. Desse modo, a área de estudo causa maior influência no município de Santa Gertrudes, pela proximidade e possível conexão subsuperficial com o córrego homônimo, do que no município em que está geograficamente localizada.

Segundo dados de balanço hídrico divulgados por PCJ (2020), a sub-bacia Piracicaba, sub-bacia vizinha da área de estudo que abrange a maior parte do município de Cordeirópolis, foi classificada como região de muito alta criticidade, quando o saldo é nulo ou negativo crítico de demanda em relação à disponibilidade hídrica. O balanço hídrico representa o balanço entre a disponibilidade hídrica, as demandas consuntivas e as vazões de retorno.

A sub-bacia onde está inserida a área de estudo, sub-bacia Corumbataí, também não apresenta condições estáveis de disponibilidade hídrica, tendo sido classificada como região de média criticidade.

4.9. HIDROGEOLOGIA

Segundo PCJ (2020), as águas subterrâneas nas Bacias PCJ apresentam volumes disponíveis inferiores aos das águas superficiais, sendo a parcela explotável utilizada para abastecimento público e industrial, com as reservas sendo de extrema importância para regular o fluxo de base dos rios nos períodos de estiagem.

O Aquífero Guarani ocupa cerca de 50% da área das sub-bacias dos Rios Corumbataí e Piracicaba e possui um arcabouço geológico mais poroso permeável, apresentando a maior potencialidade (40 a 120 m^3/h) das unidades aquíferas presentes, entretanto, este é pouco utilizado devido ocorrência majoritariamente em áreas com menor concentração urbana (PCJ, 2020).

Nas regiões de influência da área de estudo, municípios de Santa Gertrudes (sub-bacia Corumbataí) e Cordeirópolis (sub-bacia Piracicaba), também ocorrem os aquíferos Tubarão e Serra Geral.

O Sistema Aquífero Tubarão está inserido no Grupo Itararé e Foramação Tatuí inferior e trata-se de um aquífero heterogêneo e livre (semi-confinado ou confinado

em áreas restritas), caracterizado pela baixa condutividade hidráulica e fraco potencial produtivo (ROCHA et al., 2006). A potencialidade do Aquífero Tubarão pode ser considerada baixa, mas varia bastante ao longo das Bacias PCJ, de 0 a 40 m³/h e está localizado em eixos importantes de conurbação e industrialização (PCJ, 2020).

Já o Aquífero Serra Geral trata-se de um aquífero fraturado associado as fraturas e falhas oriundas do resfriamento das instruções básicas da Formação Serra Geral. Este ocupa pequenas áreas isoladas nas Sub-bacias Corumbataí e Piracicaba, e apresenta baixa potencialidade, variando de 1 a 12 m³/h.

Destaca-se que as disponibilidades hídricas subterrâneas devem ser consideradas com cautela, pois existem dificuldades tecnológicas e econômicas no aproveitamento deste potencial hídrico que não fazem parte estimativa.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1. INSTALAÇÃO DOS POÇOS DE MONITORAMENTO

Para viabilizar a coleta de água subsuperficial para as análises *in situ* e laboratoriais, foram instalados quatro poços de monitoramento (PM) no perímetro interno da AU, arranjados de forma a representarem os quadrantes nordeste, sudeste, sudoeste e noroeste. A localização dos poços está descrita na Figura 18.

Figura 18 – Localização dos poços de monitoramento (PM) dentro da área de estudo.

Fonte: modificado de GOOGLE LLC (2022).

Os poços de monitoramento (PM) foram instalados durante os dias 21 e 22 de julho de 2021, a perfuração foi realizada por meio de trado manual e o critério de paralização foi o alcance do nível d'água ou material impenetrável, no caso, o diabásio da Formação Serra Geral. O perfil pedológico foi descrito e amostrado durante a abertura para a instalação dos poços (ANEXO A). As profundidades atingidas e as características dos poços estão descritas na Tabela 2.

Tabela 2 – Dados dos poços instalados na área de estudo.

Poço	UTM (m) - X	UTM (m) - Y	Cota	Profundidade do Poço (cm)	Quadrante
PM-01	244059	7510942	717	260	Noroeste
PM-02	244048	7510799	719	340	Sudoeste
PM-03	244157	7510906	717	190	Nordeste
PM-04	244146	7510801	718	380	Sudeste

Fonte: elaborado pela autora.

Os poços foram revestidos com tubo PVC de 50 mm de diâmetro, contendo filtro na extremidade inferior correspondentes a furos de cerca de 2 mm de diâmetro, a fim de se evitar o entupimento, os tubos foram revestidos com tecido sintético de fios finos e selados com calda de bentonita. Ao final da instalação, os poços foram esgotados com bailer para limpeza e desenvolvidos para assegurar a representatividade e qualidade das amostras (Figura 19).

Figura 19 – Fotografia do procedimento de esgotamento dos poços após instalados (PM-04).

Fonte: elaborado pela autora.

5.2. AMOSTRAGEM E ANÁLISES HIDROQUÍMICAS

Foram medidos *in situ*, antes da amostragem, o Nível D'água (NA) e os seguintes parâmetros físicos e químicos: Temperatura (T), Oxigênio dissolvido (OD), Condutividade elétrica (Ce), Sólidos Totais Dissolvidos (STD) e potencial hidrogeniônico (pH).

Para medição de nível d'água foi utilizada trena métrica e para os parâmetros físicos e químicos medidor multiparâmetro Pro2030 (YSI), previamente calibrado em laboratório para condutividade elétrica e sólidos totais dissolvidos com solução padrão de KCl (1,0 mmol/L) de condutividade elétrica conhecida (147 µS/cm a 25°C e oxigênio dissolvido com solução de sulfito de sódio (Na_2SO_3) < 0,1 mg/L de O_2. Os limites de detecção do equipamento são: -5 a 55ºC ± 0,3ºC para temperatura; 0 a 20mg/L ± 0,2 mg/L para oxigênio dissolvido; 0 a 500 µS/cm ± 1 µS/cm para condutividade elétrica; 0 a 100 g/L ± 0,1 g/L para sólidos totais dissolvidos.

Para a medição de pH foi utilizado o pHmetro portátil Kasvi K39-0014PA, calibrado em laboratório para pH 4,00 (4,01 ± 0,01 a 25 ± 0,2ºC) e 7,00 (7,01 ± 0,01 a 25 ± 0,2ºC) de 0 a 14 unidades de pH ± 0,1.

As campanhas foram realizadas 3 vezes por semestre, durante o período de 1 ano, totalizando 6 amostragens, com o objetivo de obter-se amostras representativas dos períodos hidrológicos. Um dia antes de todas as amostragens foi realizado o esgotamento dos poços para garantir a homogeneidade e representatividade das amostras, a fim de que essas reflitam coerentemente a composição do aquífero.

Para a coleta da água foi utilizado amostrador bailer de 96 cm de comprimento e 40 mm de diâmetro alçado por fio de nylon 0,3 mm. As amostras foram armazenadas em frasco de polietileno branco opaco, previamente lavados em laboratório com solução de água deionizada e ácido clorídrico (0,1 M) repetindo a limpeza três vezes com água deionizada antes de serem colocados para secar (virados para baixo) por aproximadamente quatro dias. Os frascos foram acondicionados em caixa térmica com gelo a temperatura de aproximadamente 4°C para preservação das características químicas das amostras até a execução da análise no Laboratório de Ecossistemas Aquáticos e Solos (LEAS) da Universidade Federal de Alfenas (MG) - Câmpus de Poços de Caldas (MG).

As substâncias investigadas em análise laboratorial foram: Íon sódio (Na^+), Íon potássio (K^+), íon cálcio (Ca^{2+}), íon magnésio (Mg^{2+}), ânion cloreto (Cl^-), ânion sulfato

(So_4^{2-}), ânion bicarbonato (HCO_3^-), ânion fosfato (PO_4^{3-}), ânion nitrato (NO_3^-) e ânion carbonato (CO_3^{2-}), seguindo as orientações da norma NBR9898 (ABNT, 1987).

Ao chegarem ao laboratório, as amostras passavam por um processo de filtragem, utilizando um microfiltro de fibra de vidro, modelo GF-1 de 47 mm (poro 0,7 µm) de diâmetro, posicionado entre um funil de Büchner para entrada da água (superior) e um Erlenmeyer conectado a um compressor através de mangueira, promovendo a sucção do ar e auxílio do processo de filtragem.

A obtenção das concentrações se deu a partir dos seguintes métodos:

- **Bicarbonato (HCO_3^-):** método titulométrico, titulação com ácido sulfúrico 0,02 N para a faixa de concentração entre 1,0 e 500 ± 1,7 % (APHA, 2012);
- **Carbonato (CO_3^{2-}):** subtração de H^+ em HCO_3^-(DA SILVA ALVES et al., 2020);
- **Cloreto (Cl^-):** método argentométrico ou método de Mohr com titulação em solução padrão de nitrato de prata 0,0141M para a faixa de concentração entre 0,0 e 100 ± 1,7 % (APHA, 2012);
- **Sódio (Na^+) e Potássio (K^+):** Fotômetro de Chama MOD. 910 MS (padrão de Na^+ e K^+ de 20 e 100 ppm) resolução de 1,0 ppm ± 0,1 ppm (ANALYSER, 2010).
- Quantificados através de espectrofotômetro modelo DR 890 da Hach Company (HACH, 1997).
    - **Cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}):** método calmagita colorimétrica (0,0 a 4,00 mg/L, Ca^{2+} ± 0,09 mg/L e Mg^{2+} ± 0,08 mg/L com $CaCO_3$);
    - **Nitrato (NO_3^-):** método de redução de cádmio 0 a 5,0 ± 0,2 mg/L;
    - **Fosfato (PO_4^{3-}):** método do ácido ascórbico de 0 a 2,5 ± 0,05 mg/L;
    - **Sulfato (SO_4^{2-}):** método sulfaver4 0 a 70 mg/L ± 0,5 mg/L

Para os resultados acima da faixa de concentração, foram realizadas técnicas de diluição de amostras.

A dureza é uma medida baseada no teor de cálcio e magnésio da água. A dureza relativa ao CaCO3 (mg/L) é obtida pela Eq. 1 (TODD, 1980):

$$DT = 2{,}5.Ca + 4{,}1.Mg \quad \textbf{(1)}$$

Onde:

DT = dureza total (mg/L);

Ca = teor de cálcio (mg/L);

Mg = teor de magnésio (mg/L).

Todos os recipientes, antes da coleta, foram ambientados com água a ser coletada.

5.3. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para auxiliar na interpretação e avaliar possíveis correlações dos resultados das análises de parâmetros físicos e químicos e concentração de íons na água, foram aplicados métodos de estatística descritiva e análise de correlação.

A estatística descritiva consistiu no cálculo de Média, Mediana, Máximo, Mínimo, Amplitude, Intervalo Interquartil, Desvio Padrão, Variância, Assimetria e Curtose conforme Rogerson (2012).

Para correlacionar as variáveis, foi aplicada o cálculo do coeficiente de correlação de Pearson (r) (Eq. 2), uma medida de associação linear entre duas variáveis definida por:

$$r = \frac{\Sigma(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{(\Sigma((x_i - \bar{x})^2 \Sigma(y_i - \bar{y})^2)}} \quad \textbf{(2)}$$

Onde:

r é o coeficiente de correlação de Pearson.

x_i e y_i são os valores das observações nas duas variáveis.

$\bar{x}$ e $\bar{y}$ são as médias das observações nas duas variáveis.

O coeficiente de correlação (r) varia entre -1 e +1 sendo que zero significa que não há correlação, onde 1 significa uma correlação completa e o sinal do coeficiente mostra a direção da correlação sendo que r negativo significa que as variáveis estão

inversamente relacionadas e apesar de não existir uma regra específica para a interpretação qualitativa do coeficiente (AKOGLU, 2018), neste trabalho serão adotados os seguintes significados para a força da correlação, como sugerido por Shikamura (2006) (Tabela 3):

Tabela 3 – Interpretação qualitativa adotada para os valores do coeficiente da correlação de Pearson.

Coeficiente de correlação	Interpretação
0,00 a 0,19	Bem fraca
0,20 a 0,39	Fraca
0,40 a 0,69	Moderada
0,70 a 0,89	Forte
0,90 a 1,00	Muito forte

Fonte: elaborado pela autora.

5.4. POTENCIOMETRIA E SENTIDO DE FLUXO DAS ÁGUAS

Para a geração do mapa potenciométrico, foi necessário calcular as cargas hidráulicas a partir da subtração do nível d'água (m) em relação a cota topográfica (m) de cada poço medido, a fim de se obter o nivelamento topográfico em relação ao *datum* do nível do mar (BAKKER; POST, 2022).

O nível d'água (NA) utilizado foi o NA estático do poço antes das amostragens, e a cota foi obtida através da aquisição fotogramétrica feita em fevereiro de 2020 por Casagrande et al. (2021) com veículo aéreo não tripulado (VANT) modelo Phantom 4 Pro DJI (dji.com) acoplado com receptor GPS/GLONASS duplo e sensor RGB DJU 1'' CMOS de 20 megapixels. As coordenadas dos poços foram adquiridas com GPS de precisão após a instalação destes.

As cargas hidráulicas foram interpoladas pelo método matemático do inverso do quadrado da distância, a partir dos dados de carga hidráulica e coordenadas UTM, utilizando-se o software ArcGis Pro 3.1 (ESRI, 2023), a fim de se estimar a carga hidráulica em pontos não amostrados (SILVA et al., 2011).

O mapa de interpolação serviu de base para o mapa de contorno das linhas equipotenciais gerado em intervalos de 0,5 metros. O sentido do fluxo foi determinado segundo a Lei de Darcy (Eq. 3), sabendo-se que os componentes do vetor de vazão

são, tangencial a linha equipotencial (Q_s) e normal a equipotencial (Q_n) em relação ao sistema de coordenadas (s,n) (HAITJEMA, 1995):

$$\boldsymbol{Q_S = -\frac{\partial \Phi}{\partial s}} \quad \boldsymbol{e} \quad \boldsymbol{Q_n = -\frac{\partial \Phi}{\partial n}} \qquad \textbf{(3)}$$

Onde:

$\boldsymbol{Q_S}$ = Componente tangencial da vazão na direção do fluxo (ou paralela à linha equipotencial).

$\boldsymbol{Q_n}$ = Componente normal da vazão perpendicular à direção do fluxo (ou perpendicular à linha equipotencial).

$\frac{\partial \Phi}{\partial s}$ = Derivada parcial do potencial hidráulico (Φ) em relação à coordenada s.

$\frac{\partial \Phi}{\partial n}$ = Derivada parcial do potencial hidráulico (Φ) em relação à coordenada n.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1. CAMPANHAS DE MONITORAMENTO E AMOSTRAGEM

6.1.1. Resultados *In situ* – Parâmetros físicos e químicos

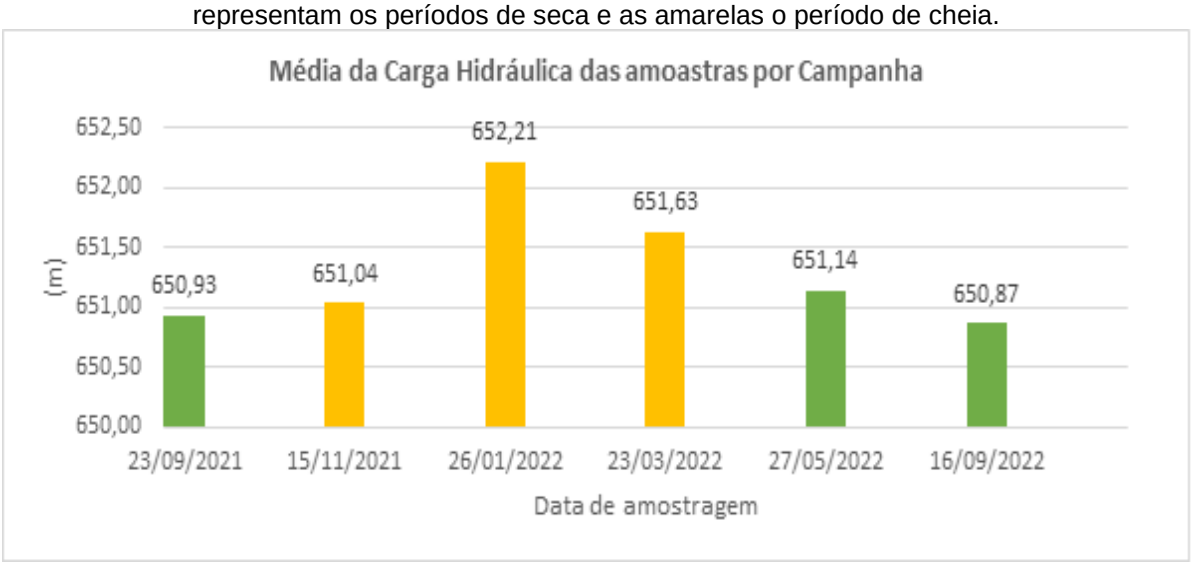
Os resultados de nível d'água mostraram variações entre o período de chuva (outubro a abril) e o período de estiagem (maio a setembro) (Figura 20), sendo que a campanha do mês de novembro ainda apresentou características de período de estiagem, influenciando na disponibilidade do volume de água na área e nos poços (nível d'água) (Tabela 4). De forma geral, o nível d'água, nos poços de monitoramento variou entre 0,11 (mínimo total) e 0,93 (máximo cheia) cm abaixo da superfície do solo nos períodos de cheia e 1,25 (mínimo estiagem) a 1,79 (máximo total) cm nos períodos de estiagem (Tabela 5).

Esses valores indicam que a área úmida recebe contribuição diretamente de água da chuva, constituindo um importante fator de entrada de água nesse sistema. Essa dinâmica conduz à expansão da área sujeita ao alagamento durante os períodos de chuva e a retração com rebaixamento do nível d'água no período de estiagem. A repetição anual dessa dinâmica caracteriza o hidroperíodo que é diretamente afetado pelos processos hidrológicos e climáticos.

E esse tipo de área úmida fornece inúmeros serviços ecossistêmicos ambientais, sociais, econômicos e hídricos, incluindo o armazenamento e recarga de água, regulação das cheias e mitigação dos efeitos das alterações climáticas e do uso

da terra (CLARKSON; AUSSEIL; GERBEAUX, 2013). O hidroperíodo influenciado diretamente pelo regime de precipitação apresenta um pulso de alagamento monomodal, (no sentido de Junk et al. (2014)) relacionado com os meses úmidos. A caracterização do hidroperíodo é igualmente importante porque ele indica a entrada e a saída da água e as condições de subsuperfície possíveis de serem mensurados para determinação do tempo de residência e o total de água estocada em um dado período de análise.

Figura 20 – Média da carga hidráulica das amostras em cada campanha. As barras verdes representam os períodos de seca e as amarelas o período de cheia.



Fonte: elaborado pela autora.

Contudo, embora ciente da necessidade de ampliar o tempo de monitoramento, os valores de flutuação do nível freático não ultrapassaram a superfície do solo mesmo no período úmido com chuvas concentradas. Essa dinâmica pode ser o resultado de eventual mudança no regime climático (secas mais severas ou volume de chuvas irregulares ou menores) ou o aumento da evapotranspiração e/ou diminuição da capacidade de retenção hídrica do solo em razão da agricultura intensiva que impacta mais acentuadamente as pequenas áreas úmidas (BLACKWELL; PILGRIM, 2011; WADA et al., 2011).

Tabela 4 – Parâmetros Físicos e químicos medidos na área de estudo.

		Parâmetros Físicos e químicos					
Campanha	**Poço**	**NA (m)**	**T (°C)**	**OD (mg/L)**	**Ce (µS/cm)**	**STD (mg/L)**	**pH**
1ª 23/09/2021	PM-01	1,75	19,7	0,1	119,5	101	6,3
	PM-02	1,63	20,3	0,4	270,2	228,1	6,1
	PM-03	1,45	20,5	0,5	96,4	79,1	5,1
	PM-04	1,45	19,8	0,3	65,7	55,6	5,8
2ª 15/11/2021	PM-01	1,62	22,8	1,8	409,9	327,4	5,5
	PM-02	1,57	21,8	1,3	426	284,2	6,1
	PM-03	1,36	21,6	0,5	77,4	53,7	5,5
	PM-04	1,3	21,9	1,7	56,5	39	5,5
3ª 26/01/2022	PM-01	0,39	22,6	0,7	87,9	41,4	5,3
	PM-02	0,29	22,1	0,4	520	247,7	5,8
	PM-03	0,36	22,5	1,3	86,1	40,7	6,4
	PM-04	0,11	22,4	1,1	88,6	42	5,4
4ª 23/03/2022	PM-01	0,93	22,8	0,3	209,2	98,3	5,6
	PM-02	0,9	23	0,4	415,7	194,5	5,8
	PM-03	0,82	23,3	0,4	49,3	23	5,5
	PM-04	0,85	23,4	0,1	236,6	109,8	5,8
5ª 27/05/2022	PM-01	1,44	21,2	1,85	114,5	55,7	5,5
	PM-02	1,46	21,2	1,58	449,1	218	6
	PM-03	1,31	21,8	2,59	31,8	15,2	5,7
	PM-04	1,25	21,6	0,96	136,4	65,7	5,9
6ª 16/09/2022	PM-01	1,61	19,4	4,23	57,3	28,9	6,2
	PM-02	1,79	19,7	5,6	477	238,7	6,8
	PM-03	1,38	20,1	4,63	24,8	12,3	6,7
	PM-04	1,76	19,9	4,9	74,1	37	6,6

Fonte: elaborado pela autora.

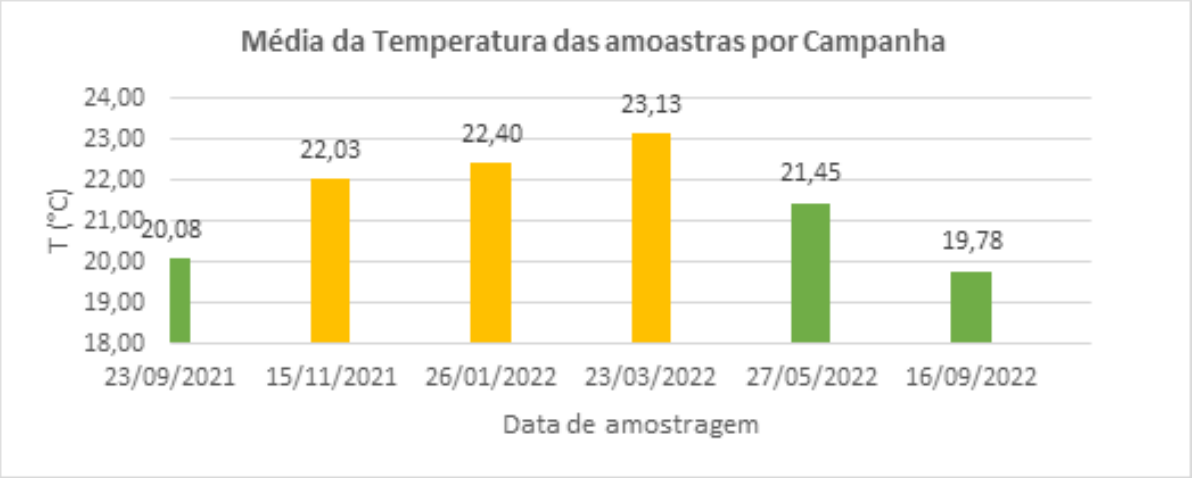
Tabela 5 – Análise estatística descritiva para os valores dos parâmetros Físicos e químicos medidos na área de estudo.

Amostragem	Parâmetro	Média	Mediana	Máximo	Mínimo	Amplitude	Intervalo Interquartil	Desvio Padrão	Variância	Assimetria	Curtose
1ª - estiagem	NA (m)	1,57	1,54	1,75	1,45	0,30	0,21	0,15	0,02	0,54	-2,94
2ª - cheia	NA (m)	1,46	1,47	1,62	1,30	0,32	0,24	0,16	0,02	-0,04	-4,80
3ª - cheia	NA (m)	0,29	0,33	0,39	0,11	0,28	0,12	0,13	0,02	-1,39	1,68
4ª - cheia	NA (m)	0,88	0,88	0,93	0,82	0,11	0,06	0,05	0,00	0,00	-2,76
5ª - estiagem	NA (m)	1,37	1,38	1,46	1,25	0,21	0,15	0,10	0,01	-0,26	-4,16
6ª - estiagem	NA (m)	1,64	1,69	1,79	1,38	0,41	0,22	0,19	0,04	-1,11	0,16
Total	NA (m)	1,20	1,37	1,79	0,11	1,68	0,69	0,50	0,25	-0,91	-0,29
1ª - estiagem	T (ºC)	20,08	20,05	20,50	19,70	0,80	0,58	0,39	0,15	0,17	-4,41
2ª - cheia	T (ºC)	22,03	21,85	22,80	21,60	1,20	0,38	0,53	0,28	1,67	3,05
3ª - cheia	T (ºC)	22,40	22,45	22,60	22,10	0,50	0,20	0,22	0,05	-1,19	1,50
4ª - cheia	T (ºC)	23,13	23,15	23,40	22,80	0,60	0,38	0,28	0,08	-0,32	-3,03
5ª - estiagem	T (ºC)	21,45	21,40	21,80	21,20	0,60	0,45	0,30	0,09	0,37	-3,90
6ª - estiagem	T (ºC)	19,78	19,80	20,10	19,40	0,70	0,32	0,30	0,09	-0,42	-0,42
Total	T (ºC)	21,48	21,70	23,40	19,40	4,00	2,28	1,27	1,61	-0,20	-1,29
1ª - estiagem	OD (mg/L)	0,33	0,35	0,50	0,10	0,40	0,18	0,17	0,03	-0,75	0,34
2ª - cheia	OD (mg/L)	1,33	1,50	1,80	0,50	1,30	0,63	0,59	0,35	-1,30	1,10
3ª - cheia	OD (mg/L)	0,88	0,90	1,30	0,40	0,90	0,53	0,40	0,16	-0,25	-2,51
4ª - cheia	OD (mg/L)	0,30	0,35	0,40	0,10	0,30	0,15	0,14	0,02	-1,41	1,50
5ª - estiagem	OD (mg/L)	1,75	1,72	2,59	0,96	1,63	0,61	0,68	0,46	0,25	0,76
6ª - estiagem	OD (mg/L)	4,84	4,77	5,60	4,23	1,37	0,55	0,58	0,33	0,71	0,80
Total	OD (mg/L)	1,57	1,03	5,60	0,10	5,50	1,41	1,64	2,69	1,41	0,89
1ª - estiagem	Ce (µS/cm)	137,95	107,95	270,20	65,70	204,50	68,45	90,88	8258,98	1,65	2,93
2ª - cheia	Ce (µS/cm)	242,45	243,65	426,00	56,50	369,50	341,75	202,94	41183,00	0,00	-5,92
3ª - cheia	Ce (µS/cm)	195,65	88,25	520,00	86,10	433,90	109,00	216,24	46757,96	2,00	4,00
4ª - cheia	Ce (µS/cm)	227,70	222,90	415,70	49,30	366,40	112,15	150,10	22530,67	0,19	1,35
5ª - estiagem	Ce (µS/cm)	182,95	125,45	449,10	31,80	417,30	120,75	183,06	33511,48	1,63	3,02
6ª - estiagem	Ce (µS/cm)	158,30	65,70	477,00	24,80	452,20	125,65	213,45	45560,86	1,94	3,82
Total	Ce (µS/cm)	190,83	105,45	520,00	24,80	495,20	233,13	164,88	27185,40	0,90	-0,81
1ª - estiagem	STD (mg/L)	115,95	90,05	228,10	55,60	172,50	59,55	77,03	5933,72	1,66	2,91
2ª - cheia	STD (mg/L)	176,08	168,95	327,40	39,00	288,40	244,98	150,95	22785,16	0,06	-5,55
3ª - cheia	STD (mg/L)	92,95	41,70	247,70	40,70	207,00	52,20	103,17	10643,64	2,00	4,00
4ª - cheia	STD (mg/L)	106,40	104,05	194,50	23,00	171,50	51,50	70,22	4931,45	0,20	1,39
5ª - estiagem	STD (mg/L)	88,65	60,70	218,00	15,20	202,80	58,20	88,95	7912,91	1,63	3,03
6ª - estiagem	STD (mg/L)	79,23	32,95	238,70	12,30	226,40	62,68	106,81	11408,93	1,94	3,82
Total	STD (mg/L)	109,88	60,70	327,40	12,30	315,10	160,10	96,75	9359,94	0,97	-0,47
1ª - estiagem	pH	5,83	5,95	6,30	5,10	1,20	0,52	0,53	0,28	-1,16	1,09
2ª - cheia	pH	5,65	5,50	6,10	5,50	0,60	0,15	0,30	0,09	2,00	4,00
3ª - cheia	pH	5,73	5,60	6,40	5,30	1,10	0,58	0,50	0,25	1,06	0,00
4ª - cheia	pH	5,68	5,70	5,80	5,50	0,30	0,23	0,15	0,02	-0,37	-3,90
5ª - estiagem	pH	5,78	5,80	6,00	5,50	0,50	0,28	0,22	0,05	-0,48	-1,70
6ª - estiagem	pH	6,58	6,65	6,80	6,20	0,60	0,23	0,26	0,07	-1,44	2,23
Total	pH	5,87	5,80	6,80	5,10	1,70	0,63	0,45	0,21	0,52	-0,44

Fonte: elaborado pela autora.

A temperatura medida *in situ*, considerando-se todas as campanhas, mostrou variação total (amplitude) de 4° e ligeira, porém reconhecível variação sazonal (Figura 21). Nas campanhas dos meses de chuva (também mais quentes) as temperaturas foram mais elevadas, enquanto as amostras coletadas nos períodos de seca em meses mais frios as temperaturas foram mais baixas. Esse cenário sugere que a água coletada sofre influência atmosférica, visto que em aquíferos confinados a variação seria majoritariamente condicionada a profundidade (gradiente geotérmico) de coleta e não a temperatura ambiente (DIAS et al., 2002).

Figura 21 – Média de temperatura das amostras em cada campanha. As barras verdes representam os períodos de seca e as amarelas o período de cheia.



Fonte: elaborado pela autora.

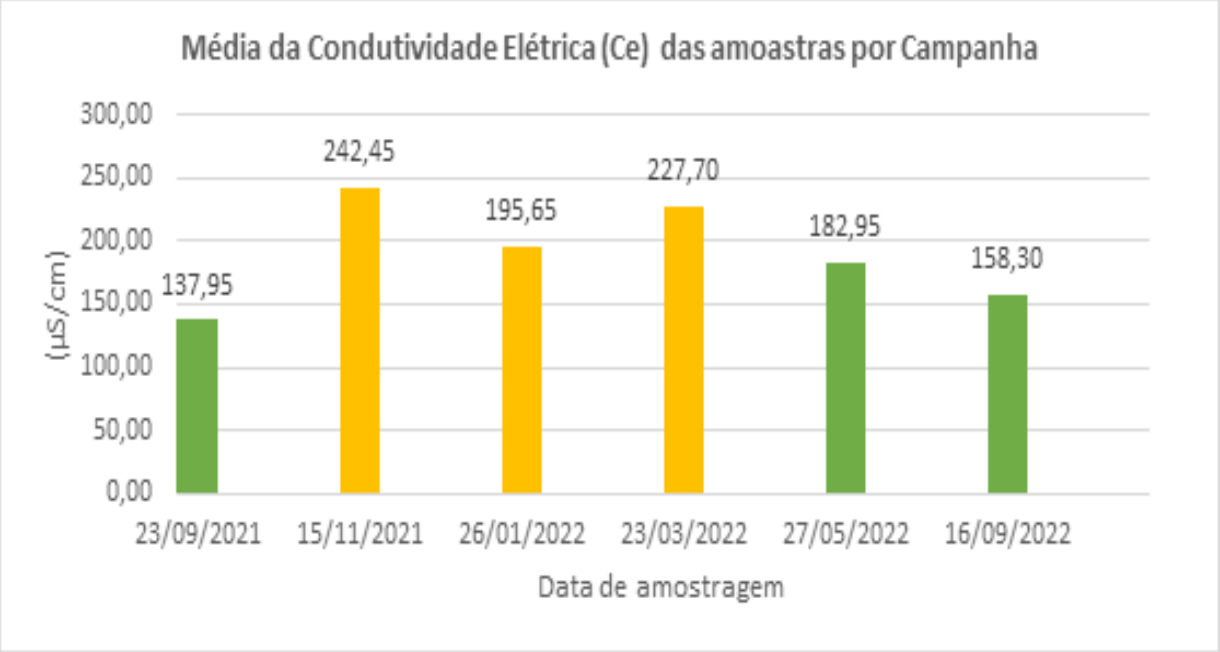
Os valores de oxigênio dissolvido (OD) estão dentro do esperado para água subterrânea (CETESB, 2019), variando de 0,1(mínimo total) a 5,6 (máximo total) e mostram variação conforme a oscilação de temperatura.

A média da condutividade elétrica (Ce) das amostras por campanha mostrou ligeira variação acompanhando a sazonalidade (Figura 22), mostrando valores maiores no período de cheia (máximo total de 520 µS/cm) e menores na estiagem (mínimo total de 24,8 µS/cm), com exceção da segunda campanha, em que os valores foram os maiores obtidos em todas as campanhas devido a maiores valores nos poços PM-01 e PM-02. Além disso, tanto a amplitude total quanto a específica de cada campanha ficaram acima de 200 µS/cm, condicionada pela discrepância entre os valores do poço PM-02, e ocasionalmente PM-01, e os demais poços na mesma campanha.

Segundo a CETESB (2019), valores de condutividade elétrica em níveis superiores a 100 µS/cm geralmente indicam ambientes impactados e/ou com alta presença de sais, o que pode indicar que estes poços, localizados a montante da bacia hidrográfica, estejam recebendo e retendo os sais oriundos do cultivo circundante, como é característico de uma área úmida. Adicionalmente, o aumento da salinidade das águas das áreas úmidas estão relacionados com o enriquecimento de Na+, Mg2+, and SO_4^{2-} via intemperismo e pelo fluxo das águas subterrâneas (GOLDHABER et al., 2014). Dessa forma, considerando a heterogeneidade, é possível que a introdução de sulfatos via escoamento superficial (lixiviação) possa contribuir de forma importante para o aumento da concentração de sais em alguns poços.

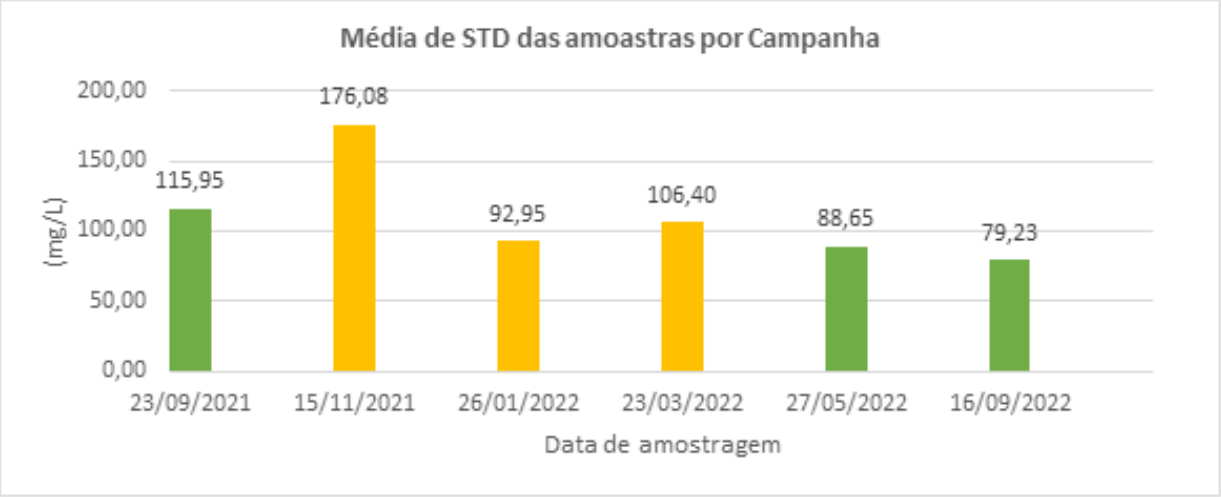
As médias dos valores de sólidos totais dissolvidos (STD) medidos *in situ* (Figura 23), em geral, coerentemente acompanharam as oscilações da condutividade elétrica, visto o indicativo de alta salinidade e consequente maior presença de sólidos dissolvidos, também apresentando grandes amplitudes condicionadas aos valores dos poços PM-02 e PM-01. O valor máximo total, em período de cheia, foi de 327,4 mg/L e o valor mínimo total, em período de estiagem, foi de 12,3 mg/L.

Figura 22 – Média da condutividade elétrica (Ce) das amostras em cada campanha. As barras verdes representam os períodos de seca e as amarelas o período de cheia.



Fonte: elaborado pela autora.

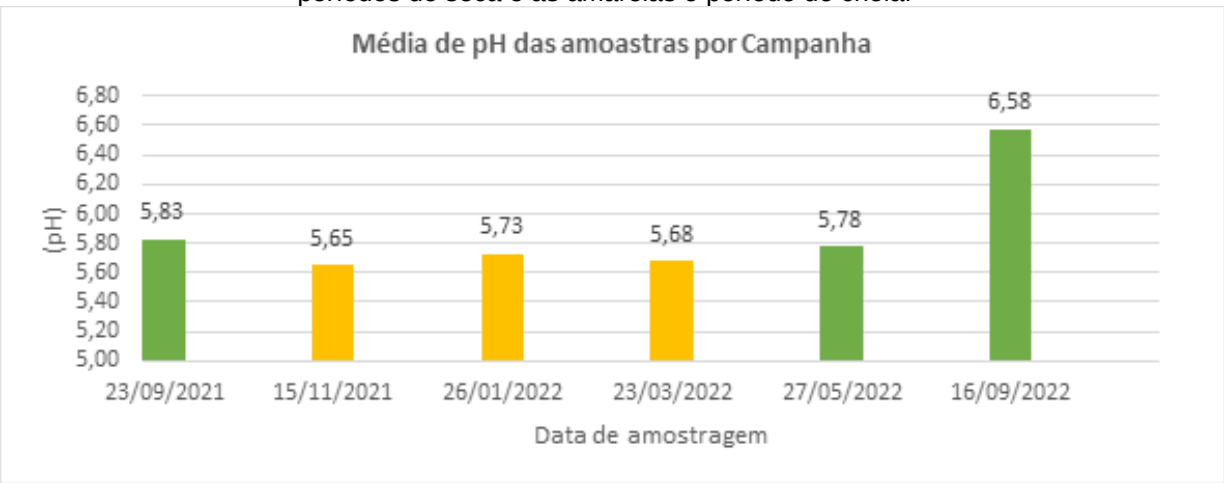
Figura 23 – Média dos sólidos totais dissolvidos (STD) das amostras em cada campanha. As barras verdes representam os períodos de seca e as amarelas o período de cheia.



Fonte: elaborado pela autora.

Os valores de pH ficaram entre de 5,1 a 6,8 nos poços de uma mesma campanha (máxima amplitude de 1,20, na primeira campanha). Também foi observada pouca variação nas médias dos valores de cada campanha (Figura 24), com exceção da última campanha, que mostrou valores mais elevados, menos ácidos, que as campanhas anteriores, tendo sido observada ligeira variação sazonal, com os valores mais ácidos de pH durante os períodos de cheia.

Figura 24 – Média de pH das amostras em cada campanha. As barras verdes representam os períodos de seca e as amarelas o período de cheia.



Fonte: elaborado pela autora.

6.1.2. Resultados Analíticos e Hidroquímica

Para os ânions e cátions analisados, a média dos poços por campanha aponta que os maiores constituintes da água, acima de 5mg/L, foram bicarbonato (HCO3-) e

carbonato (CO32-) acompanhados de sódio (Na+), sulfato (SO42-) e cloreto (Cl-), e os menores constituintes foram potássio (K+), cálcio (Ca2+), magnésio (Mg2+), fosfato (PO43-) e nitrato (NO3-) (Tabela 6 e 7 e Figura 25).

Tabela 6 – Resultados analíticos para as substâncias de interesse.

		Resultados Analíticos (mg/L)										
Campanha	**Poço**	**Na+**	**K+**	**Ca2+**	**Mg2+**	**Cl-**	**SO42-**	**HCO3-**	**PO43-**	**NO3-**	**CO32-**	**DT**
1ª 23/09/2021	PM-01	9,40	6,60	0,10	1,04	22,12	13,00	31,73	0,10	0,50	30,72	4,51
	PM-02	32,20	1,40	0,20	1,02	16,39	64,00	109,83	0,17	0,60	108,82	4,68
	PM-03	25,60	2,80	0,74	0,61	46,71	13,00	25,63	0,20	2,00	24,62	4,35
	PM-04	7,70	2,40	0,78	0,68	13,11	15,00	14,64	0,13	0,70	13,64	4,74
2ª 15/11/2021	PM-01	3,90	3,50	1,90	0,74	10,65	3,00	9,15	0,07	0,45	8,14	7,78
	PM-02	31,00	0,30	0,54	1,08	7,37	48,00	111,66	0,08	0,47	110,65	5,78
	PM-03	7,20	2,50	1,08	0,92	11,06	5,00	10,98	0,08	0,41	9,98	6,47
	PM-04	5,50	1,50	1,42	0,64	7,37	3,00	10,98	0,05	0,63	9,98	6,17
3ª 26/01/2022	PM-01	2,90	5,00	0,36	0,40	10,79	2,00	21,97	0,24	0,80	20,97	2,54
	PM-02	31,80	0,40	0,21	0,46	11,15	33,00	200,14	0,22	0,00	199,14	2,41
	PM-03	8,30	1,10	0,42	0,46	10,79	0,00	30,51	0,24	0,20	29,51	2,94
	PM-04	5,00	2,80	0,47	0,28	9,71	3,00	24,41	0,19	1,20	23,41	2,32
4ª 23/03/2022	PM-01	7,60	2,40	0,03	0,42	11,92	36,00	58,58	0,29	2,60	57,58	1,80
	PM-02	28,80	0,40	0,00	0,40	10,09	38,00	207,46	0,24	0,80	206,46	1,64
	PM-03	3,10	0,70	0,74	0,42	7,34	1,00	12,20	0,23	1,00	11,20	3,57
	PM-04	11,70	2,10	0,00	0,33	7,80	21,00	100,07	0,32	4,20	99,07	1,35
5ª 27/05/2022	PM-01	8,10	2,70	0,08	0,74	7,42	21,00	34,17	0,51	1,20	33,16	3,23
	PM-02	36,60	0,70	0,04	0,67	7,92	58,00	256,27	0,41	0,50	255,26	2,85
	PM-03	4,20	0,60	0,76	0,43	8,41	0,00	10,98	0,29	1,20	9,97	3,66
	PM-04	13,10	1,50	0,06	0,31	8,91	18,00	62,24	0,56	1,30	61,23	1,42

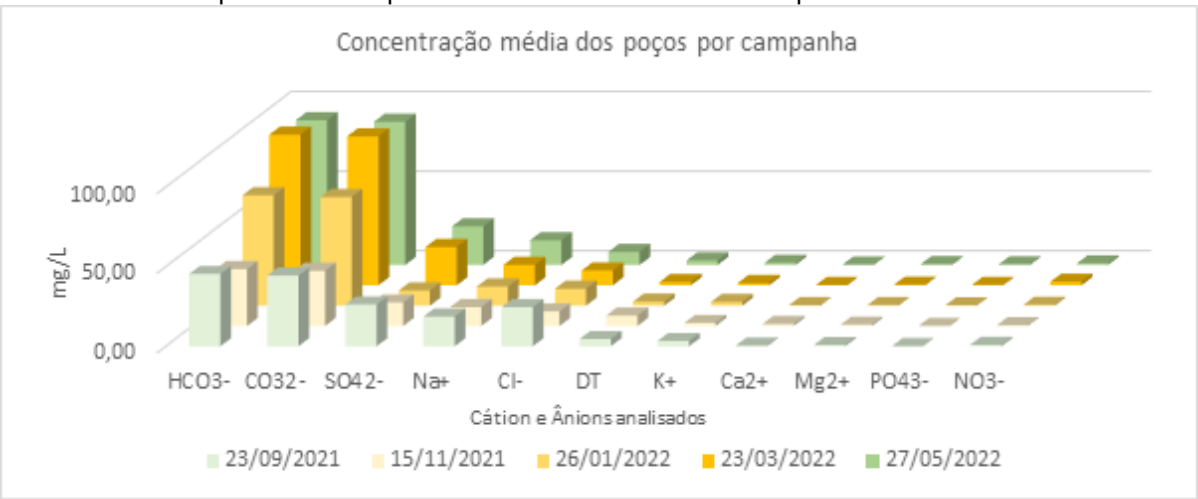
Fonte: elaborado pela autora.

Tabela 7 – Análise estatística descritiva para os resultados analíticos.

Amostragem	Íons (Mg/L)	Média	Mediana	Máximo	Mínimo	Amplitude	Intervalo Interquartil	Desvio Padrão	Variância	Assimetria	Curtose
1ª - estiagem	Ca2+	0,46	0,47	0,78	0,10	0,68	0,58	0,35	0,13	-0,06	-5,55
2ª - cheia	Ca2+	1,24	1,25	1,90	0,54	1,36	0,60	0,57	0,33	-0,14	-0,14
3ª - cheia	Ca2+	0,37	0,39	0,47	0,21	0,26	0,11	0,11	0,01	-1,12	1,13
4ª - cheia	Ca2+	0,19	0,02	0,74	0,00	0,74	0,21	0,37	0,13	1,99	3,97
5ª - estiagem	Ca2+	0,24	0,07	0,76	0,04	0,72	0,20	0,35	0,12	1,99	3,96
Total	Ca2+	0,50	0,39	1,90	0,00	1,90	0,67	0,52	0,27	1,32	1,60
1ª - estiagem	Cl-	24,58	19,26	46,71	13,11	33,60	12,70	15,21	231,48	1,66	2,77
2ª - cheia	Cl-	9,11	9,01	11,06	7,37	3,69	3,38	2,02	4,08	0,04	-5,79
3ª - cheia	Cl-	10,61	10,79	11,15	9,71	1,44	0,36	0,62	0,39	-1,54	2,89
4ª - cheia	Cl-	9,29	8,95	11,92	7,34	4,58	2,86	2,13	4,53	0,56	-2,48
5ª - estiagem	Cl-	8,17	8,17	8,91	7,42	1,49	0,74	0,64	0,41	0,00	-1,14
Total	Cl-	12,35	10,37	46,71	7,34	39,37	3,45	8,83	78,04	3,46	13,15
1ª - estiagem	CO_3^{2-} $^{+}HCO_{3-}$	89,91	56,35	218,65	28,28	190,37	56,74	86,99	7566,40	1,84	3,51
2ª - cheia	CO_3^{2-} $^{+}HCO_{3-}$	70,38	20,96	222,31	17,29	205,02	51,26	101,30	10261,98	2,00	3,99
3ª - cheia	CO_3^{2-} $^{+}HCO_{3-}$	137,52	53,92	399,28	42,94	356,34	98,24	174,66	30505,34	1,99	3,97
4ª - cheia	CO_3^{2-} $^{+}HCO_{3-}$	188,16	157,65	413,92	23,40	390,52	159,87	166,75	27806,00	0,96	0,99
5ª - estiagem	CO_3^{2-} $^{+}HCO_{3-}$	180,82	95,40	511,53	20,95	490,58	164,75	224,42	50365,51	1,79	3,31
Total	CO_3^{2-} $^{+}HCO_{3-}$	133,36	61,24	511,53	17,29	494,24	176,96	149,39	22317,00	1,50	1,24
1ª - estiagem	PO_4^{3-}	0,15	0,15	0,20	0,10	0,10	0,06	0,04	0,00	0,00	-2,07
2ª - cheia	PO_4^{3-}	0,07	0,08	0,08	0,05	0,03	0,02	0,01	0,00	-1,41	1,50
3ª - cheia	PO_4^{3-}	0,22	0,23	0,24	0,19	0,05	0,03	0,02	0,00	-1,19	0,44
4ª - cheia	PO_4^{3-}	0,27	0,27	0,32	0,23	0,09	0,06	0,04	0,00	0,37	-3,44
5ª - estiagem	PO_4^{3-}	0,44	0,46	0,56	0,29	0,27	0,14	0,12	0,01	-0,65	-1,09
Total	PO_4^{3-}	0,23	0,23	0,56	0,05	0,51	0,17	0,14	0,02	0,93	0,64
1ª - estiagem	Mg^{2+}	0,84	0,85	1,04	0,61	0,43	0,36	0,22	0,05	-0,08	-5,48
2ª - cheia	Mg^{2+}	0,85	0,83	1,08	0,64	0,44	0,25	0,19	0,04	0,33	-2,01
3ª - cheia	Mg^{2+}	0,40	0,43	0,46	0,28	0,18	0,09	0,08	0,01	-1,41	1,50
4ª - cheia	Mg^{2+}	0,39	0,41	0,42	0,33	0,09	0,04	0,04	0,00	-1,73	2,92
5ª - estiagem	Mg^{2+}	0,54	0,55	0,74	0,31	0,43	0,29	0,20	0,04	-0,19	-3,80
Total	Mg^{2+}	0,60	0,54	1,08	0,28	0,80	0,33	0,25	0,06	0,66	-0,75
1ª - estiagem	$Na^{+}+K^{+}$	22,03	22,20	33,60	10,10	23,50	15,18	10,85	117,71	-0,05	-3,60
2ª - cheia	$Na^{+}+K^{+}$	13,85	8,55	31,30	7,00	24,30	7,80	11,69	136,75	1,94	3,78
3ª - cheia	$Na^{+}+K^{+}$	14,33	8,65	32,20	7,80	24,40	7,23	11,94	142,54	1,98	3,92
4ª - cheia	$Na^{+}+K^{+}$	14,20	11,90	29,20	3,80	25,40	9,20	10,82	116,99	1,15	1,76
5ª - estiagem	$Na^{+}+K^{+}$	16,88	12,70	37,30	4,80	32,50	10,98	14,20	201,69	1,52	2,62
Total	$Na^{+}+K^{+}$	16,26	10,45	37,30	3,80	33,50	20,73	11,09	122,98	0,80	-1,03
1ª - estiagem	NO_{3-}	0,95	0,65	2,00	0,50	1,50	0,45	0,70	0,50	1,92	3,73
2ª - cheia	NO_{3-}	0,49	0,46	0,63	0,41	0,22	0,07	0,10	0,01	1,60	2,87
3ª - cheia	NO_{3-}	0,55	0,50	1,20	0,00	1,20	0,75	0,55	0,30	0,32	-3,03
4ª - cheia	NO_{3-}	2,15	1,80	4,20	0,80	3,40	2,05	1,59	2,52	0,79	-1,51
5ª - estiagem	NO_{3-}	1,05	1,20	1,30	0,50	0,80	0,20	0,37	0,14	-1,90	3,71
Total	NO_{3-}	1,04	0,75	4,20	0,00	4,20	0,71	0,96	0,92	2,21	5,73
1ª - estiagem	SO_4^{2-}	26,25	14,00	64,00	13,00	51,00	14,25	25,18	634,25	1,99	3,97
2ª - cheia	SO_4^{2-}	14,75	4,00	48,00	3,00	45,00	12,75	22,19	492,25	1,99	3,96
3ª - cheia	SO_4^{2-}	9,50	2,50	33,00	0,00	33,00	9,00	15,72	247,00	1,96	3,88
4ª - cheia	SO_4^{2-}	24,00	28,50	38,00	1,00	37,00	20,50	17,11	292,67	-1,03	-0,30
5ª - estiagem	SO_4^{2-}	24,25	19,50	58,00	0,00	58,00	16,75	24,34	592,25	1,11	2,13
Total	SO_4^{2-}	19,75	14,00	64,00	0,00	64,00	30,75	20,02	400,93	0,96	-0,11

Fonte: elaborado pela autora.

Figura 25 – Concentração médias dos constituintes da água por campanha. As barras verdes representam os períodos de seca e as amarelas o período de cheia.



Fonte: elaborado pela autora.

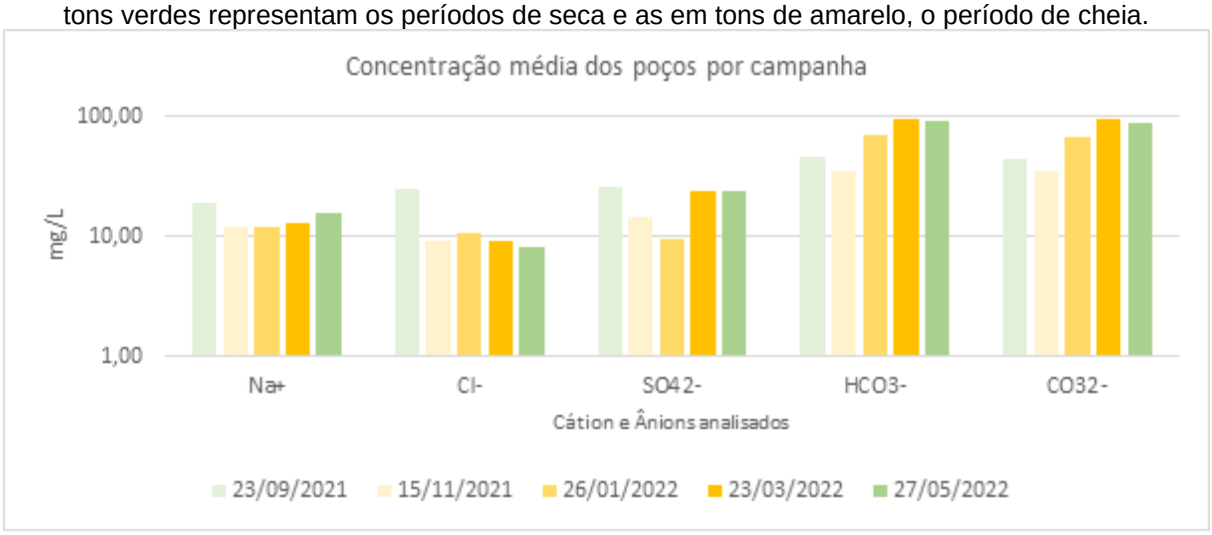
É perceptível a influência sazonal nas concentrações. A concentração média máxima de bicarbonato e carbonato (188,16 mg/L, 4ª campanha) obtiveram seu pico máximo durante o período de chuvas (aumento do nível de água na depressão topográfica), valores cerca 2,7 vezes maiores que as concentrações ao final do período de estiagem (70,38 2ª campanha), enquanto as concentrações médias de sódio (11,90 mg/L, 2ª campanha) e cloreto (8,17 mg/L, 5ª campanha) obtiveram seu pico ao final e durante os períodos de estiagem, respectivamente, (abaixamento do nível de água) (Figura 26).

Na água, o bicarbonato pode ser derivado de duas fontes principais: Uma pela dissociação do CO2 atmosférico (difusão gasosa de CO2 em solução) e outra pela dissolução de carbonatos (TRANTER et al., 1993). Na área estudada, sobre diabásio, a primeira fonte é a mais plausível. Bicarbonato é o ânion mais abundante em corpos hídricos enquanto o cloreto é reportado como bastante expressivos em lagos, seja por fontes naturais devido ao intemperismo de minerais ou antrópicas proveniente do uso de fertilizantes agrícolas (RAUT et al., 2012; SCHLESINGER, 2004).

Num contexto hidrogeológico semelhante ao da presente área de estudo, aquífero livre na Fm. Serra Geral, Gastmans et al. (2016) descrevem que o fluxo das águas subterrâneas é determinado pela topografia e drenagens locais de descarga, com a composição das águas apresentando baixo teor de solutos sendo bicarbonato o principal ânion e cálcio e magnésio os principais cátions, com possíveis aumentos de sódio relacionados ao aumento dos sólidos totais dissolvidos (STD), cenário também identificado para as águas da AU estudada. Os autores também identificaram

assinatura isotópica semelhante à água da chuva, indicando uma origem meteórica para a recarga desse aquífero. Estudo conduzido por Dos Santos e Gastmans (2016) para avaliar a composição da água da chuva na região do polo cerâmico de Santa Gertrudes, contexto em que está inserida a área desse estudo, mostraram composição dominada pelo íon HCO_3^- (bicarbonato) e demais íons de origem tanto natural quanto antropogênica, assim como para as amostras analisadas neste trabalho.

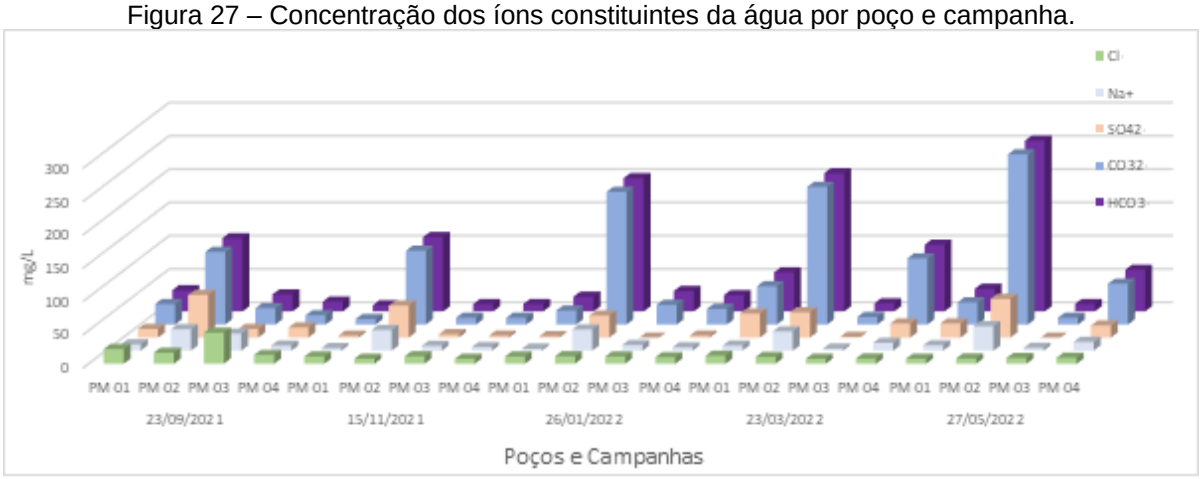
Figura 26 – Concentração média dos maiores constituintes da água por campanha. As barras em tons verdes representam os períodos de seca e as em tons de amarelo, o período de cheia.



Fonte: elaborado pela autora.

Vale destacar os valores identificados nas amostras do poço PM-02, que apresentou em todas as 5 campanhas, carbonato, bicarbonato e sódio cerca de 1 ordem de grandeza acima dos valores identificados para os demais poços. Picos mais sutis de carbonato, bicarbonato e sulfato também foram identificados nos poços PM-01 e PM-04 no início e no auge do período seco, nas campanhas de 23/03 e 27/05/2022. Para cloreto e sódio houve ligeiros picos no poço PM-03 na primeira campanha, em setembro de 2021, ainda no período seco. Esses resultados são coerentes com os valores das medições de condutividade elétrica que também mostraram picos no PM-02 e PM-01 (Figura 27).

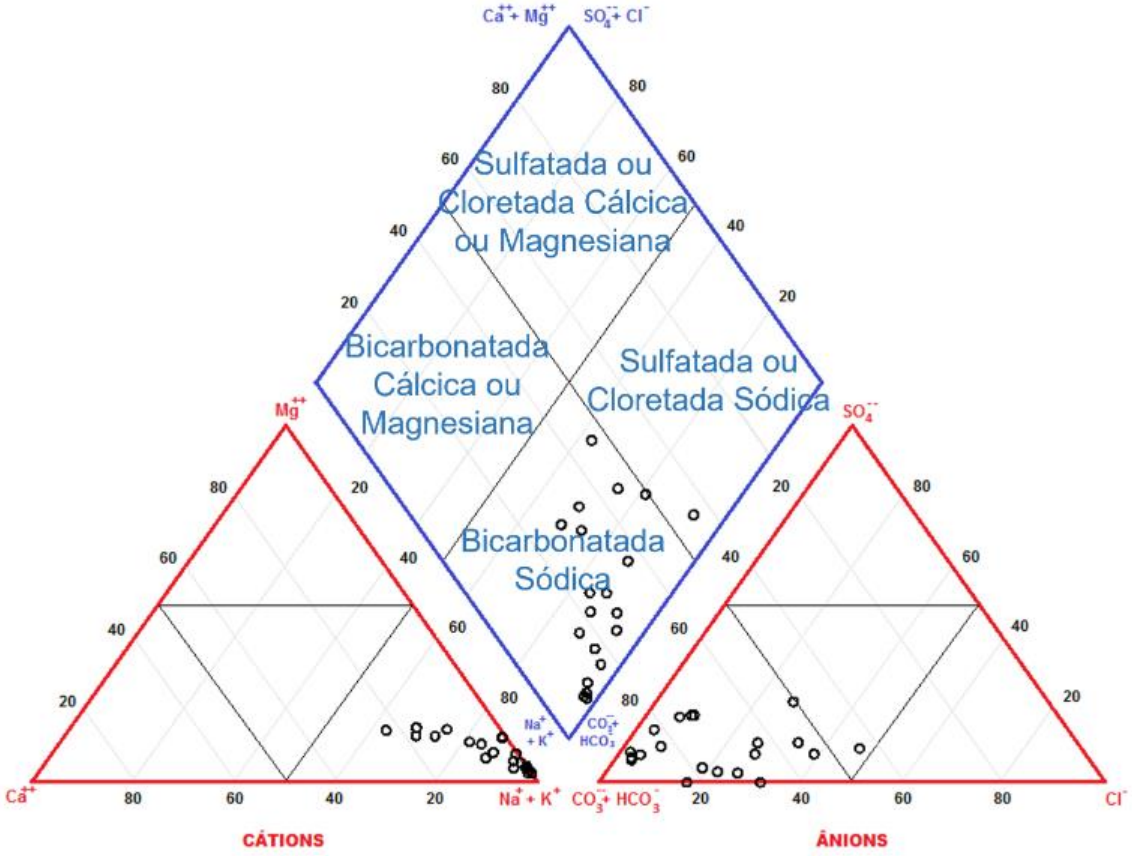
Figura 27 – Concentração dos íons constituintes da água por poço e campanha.



Fonte: elaborado pela autora.

Usando o diagrama de Piper para a classificação (Figura 28), todas as amostras foram classificadas como Sódica Bicarbonatada, com exceção da amostra do PM-03 na primeira campanha que foi classificada como Sódica Mista, como evidenciado pelo ligeiro pico de concentração de cloreto e sódio.

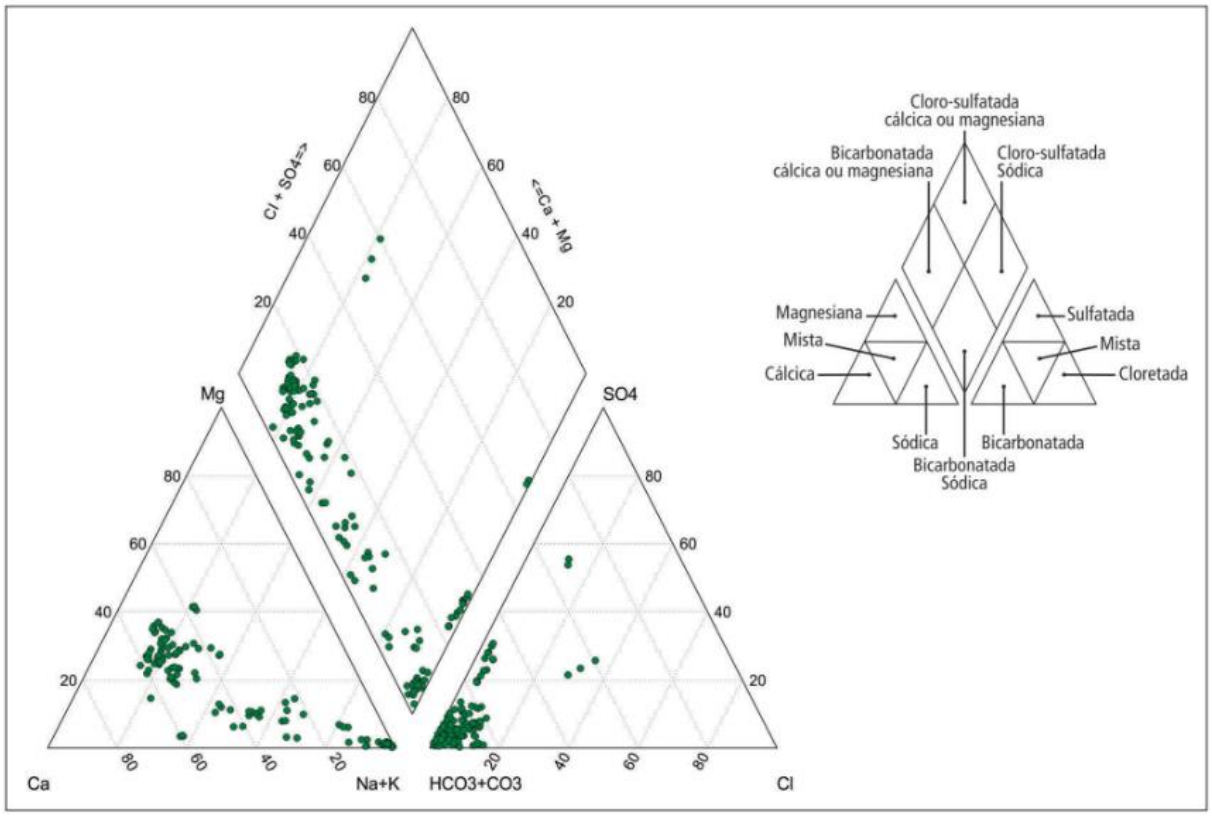
Figura 28 – Diagrama de Piper para as amostras analisadas.



Fonte: elaborado pela autora via software QualiGraf (MÖBUS, 2014).

Segundo resultados do diagrama de piper (Figura 29) gerado na avaliação feita por CETESB (2016), as águas do aquífero fraturado Serra Geral, contexto ao qual está inserida a área são preponderantemente bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas e, secundariamente, bicarbonatadas sódicas, sendo este último coerente com a classificação obtida no presente estudo. É válido ressaltar que a recarga para esse aquífero se dá por meio de precipitação pluvial sobre os solos basálticos, que atinge as zonas de alteração e fissuras da rocha matriz (CETESB, 2016).

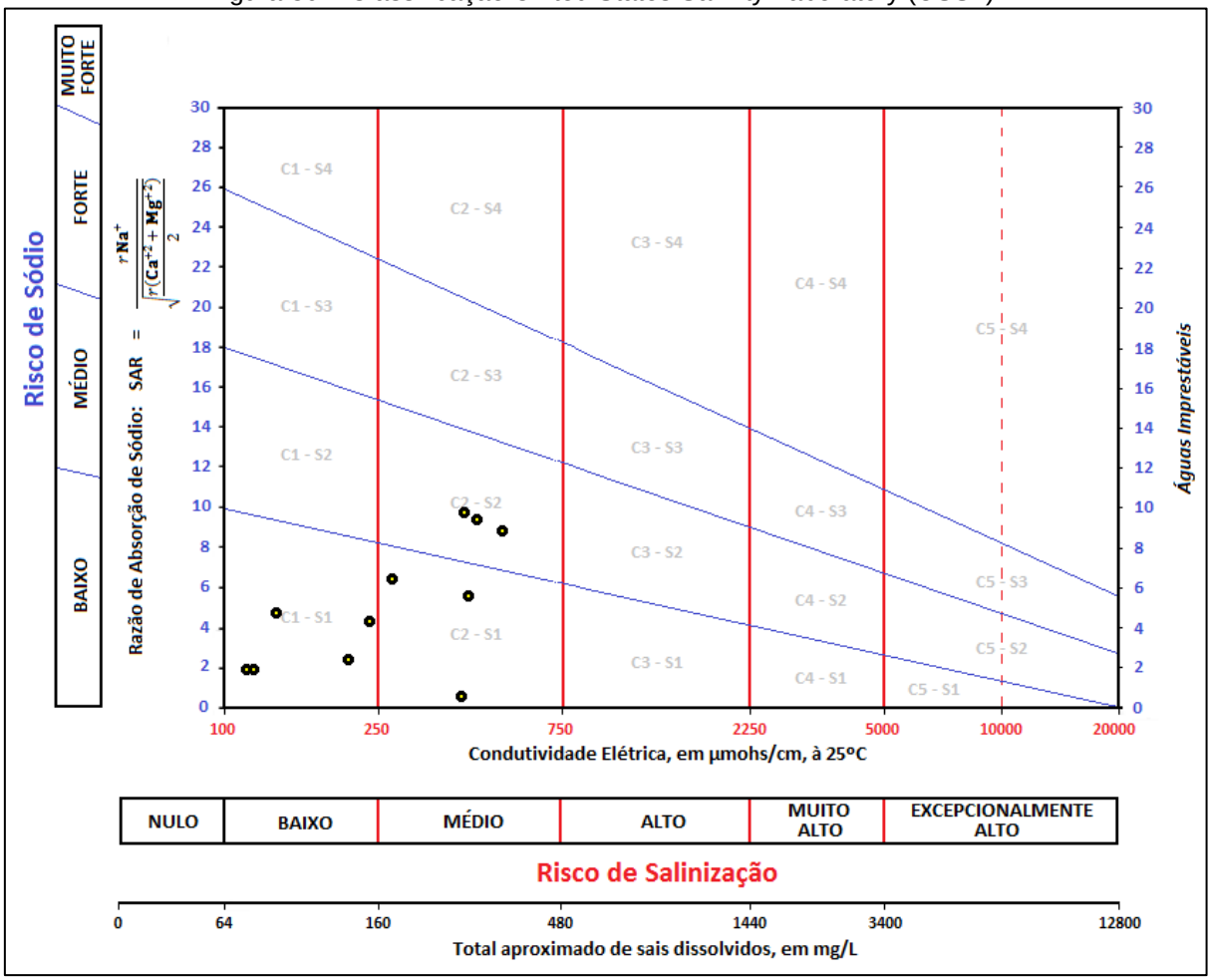
Figura 29 – Classificação das águas do Aquífero Serra Geral, segundo o Diagrama de Piper.



Fonte: CESTEB (2016).

As águas na área de estudo podem ser classificadas como apropriada para uso na irrigação, de acordo com a classificação USSL (United States Salinity Laboratory), apresentando risco de sódio nulo ou baixo em todos os poços durante o estudo, com exceção do PM-02 durante as 3 últimas campanhas, onde o risco de sódio foi médio (Figura 30).

Figura 30 – Classificação United States Salinity Laboratory (USSL).



Fonte: elaborado pela autora via software QualiGraf (MÖBUS, 2014).

6.1.3. Correlações e interpretação

A existência e dinâmica da AU são dependentes da entrada de água meteórica. A precipitação é a principal fonte de abastecimento da depressão topográfica, justificando as variações sazonais do nível e extensão do alagamento nas estações secas e úmidas do ano. Em razão dessa proveniência, espera-se que a composição da água coletada nos poços seja influenciada diretamente pela própria composição da água da chuva e pela característica química e mineralógica do solo formado *in situ*, a partir da alteração do diabásio. Adicionalmente, pode também ser influenciada pelo uso da terra ocupada por décadas com a agricultura intensiva de cana-de-açúcar e manejo convencional.

Por ser uma área geograficamente isolada, a água fica armazenada em contato por um tempo longo o suficiente com o solo, como água intersticial, com o saprólito e com a rocha (material parental), antes de ser renovada com a entrada da água da

precipitação em um novo período úmido. O padrão de concentração química da água em uma AU é extremamente complexo porque várias condições e processos interferem: (i) aumento da concentração química como resultado do escoamento superficial na encosta cujo fluxo é direcionado para a área úmida durante o período de chuva, (ii) aumento da concentração química em resposta à evapotranspiração durante o período de estiagem, (iii) diminuição da concentração química durante o período úmido como resultado da diluição, (iv) variação da concentração como resposta da absorção de nutrientes pela rizosfera (KIRK; KRONZUCKER, 2005; NELSON; RHOADES; DWIRE, 2011). Adicionalmente, correlacionar as concentrações com os parâmetros físicos e químicos é fundamental para avaliar o status, a produtividade e a sustentabilidade do ambiente, bem como contribuir com a gestão (GARIZI; SHEIKH; SADODDIN, 2011).

O diabásio, por sua composição mineralógica e falhamentos comumente associados, é intensamente suscetível ao intemperismo químico, visto sua mineralogia ser majoritariamente dominada por minerais menos estáveis (augita e plagioclásio) segundo a série de Goldich (1938). Na região da área de estudo, de acordo com Machado et al. (2005), o diabásio é composto por plagioclásio (labradorita e oligoclásio), piroxênio (augita e pigeonita), minerais opacos, olivina e mesostase quartzo-feldspática.

Estes minerais, ao sofrerem alterações intempéricas em ambiente úmido, como estudado por Clemente e Marconi (1994), tendem a liberar íons solúveis como Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+} e Na^{+} para a água sendo que alumínio e ferro permanecem imóveis, formando os minerais de alteração constituintes do solo como a caulinita e os óxidos, respectivamente.

O intemperismo químico do diabásio pode ser desencadeado por diversas reações químicas (dissolução, hidrólise, acidólise e oxidação), sendo a hidrólise uma das principais responsáveis por alterar a composição do meio aquoso através da interação dos íons H^{+} ou hidroxila (OH^{-}) presentes na água com os minerais da rocha inalterada.

Uma das principais reações químicas de alteração de minerais silicáticos, como os feldspatos, se processa por meio da reação incongruente do plagioclásio, onde os íons alcalinos (Na^{+} e Ca^{2+}) presentes na estrutura do feldspato são trocados pelo H+

da solução, aumentando o pH da água, originando uma fase amorfa que virá a ser transformada em caulinita (Eq. 4 e Eq. 5) (BLUM; STILLINGS, 2018):

$$\underset{\text{Anortita}}{CaAl_2Si_2O_8} + 2H^+ \leftrightarrow H_2Al_2Si_2O_8 + Ca^{2+} \quad \textbf{(4)}$$

$$\underset{\text{Albita}}{NaAlSi_3O_8} + H^+ \leftrightarrow HAlSi_3O_8 + Na+ \quad \textbf{(5)}$$

Vale ressaltar que composição das águas do aquífero Serra Geral, de acordo com Gastmans et al. (2016) pode refletir as interações água-rocha, devido à dissolução incongruente dos minerais do diabásio como o plagioclásio (labradorita, apresentando de 30 a 50% de albita (HURLBUT; KLEIN, 1977) (Eq. 6 e Eq. 7) e piroxênio (augita) que na presença de CO_2 atmosférico, levam à formação secundária de caulinita, minerais de quartzo e argila, liberando cálcio, sódio, magnésio, sílica e bicarbonato (constituintes do solo) (Eq. 8), conforme as reações:

$$\underset{\text{Anortita}}{CaAl_2Si_2O_8} + 2CO_2 + 3H_2O \rightarrow \underset{\text{Caulinita}}{Al_2Si_2O_5(OH)_4} + Ca^{2+} + 2HCO^-_3 \quad \textbf{(6)}$$

$$\underset{\text{Albita}}{2NaAlSI_3O_8} + 2CO_2 + 3H_2O \rightarrow \underset{\text{Caulinita}}{Al_2Si_2O_5(OH)_4} + 2Na^+ + 2HCO^-_3 + 4Si(OH)_4 \quad \textbf{(7)}$$

$$\underset{\text{Augita}}{(Ca,Mg,Fe)_2Si_2O_6} + 2CO_2 + 5H_2O \rightarrow 2(Ca^{+2},Mg^{+2},Fe^{+2}) + 2HCO^-_3 + 2Si(OH)_4 + 1/2O_2 \quad \textbf{(8)}$$

Nesse sentido, a concentração de sódio, em condições não confinadas como é considerada a área de estudo, pode ser interpretada como resultado das reações de troca consistentes com o limite entre Na e Ca (formando minerais secundários com os elementos citados), visto maior dificuldade de atingir os limites de saturação de calcita.

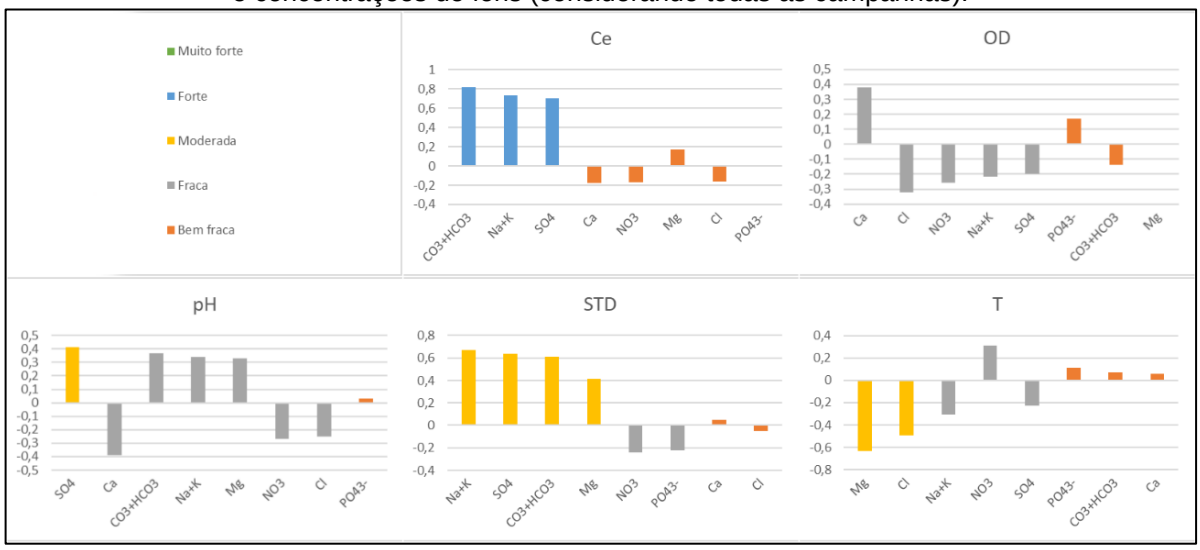
A correlação forte positiva entre os íons Na (plagioclásio), HCO3+CO32-, e SO42- (sulfato) e a condutividade elétrica (Ce) (Figura 31) e entre si (Figura 32) sugere que estes estão sendo liberados para a água simultaneamente devido a alteração dos minerais presentes no diabásio e no solo. Considerando a temperatura como uma expressão da sazonalidade, a correlação moderada negativa entre magnésio e a temperatura (figura 31), sugere que esse íon é liberado em maior quantidade nos períodos de estiagem onde há menos entrada e troca com água da chuva.

O transporte ou a acumulação de solutos em uma área úmida é dependente da evapotranspiração (MOSIMANE et al., 2017). O aumento da concentração de solutos até atingir a saturação e a remoção são variações que ocorrem durante as condições

de tempo seco e úmido, respectivamente (BARBIÉRO et al., 2002). Nas áreas úmidas cujo volume de água que entra no sistema é proveniente principalmente da precipitação e escoamento superficial da encosta, as maiores perdas de água ocorrem pela evapotranspiração (em Okavango Delta no Senegal, por exemplo, 98% do volume de água da área úmida é proveniente da chuva e apenas uma média de 2% da água representa o influxo das partes distais) e por absorção pelas plantas (MOSIMANE et al., 2017). Segundo os autores, as plantas têm função relevante na assimilação de solutos e retenção de nutrientes e se configura como um fator que interfere, também, na quantidade e padrão de distribuição dos solutos.

Na AU estudada os baixos teores dos cátions Ca e Mg sugerem a não dominância do saprólito ou da rocha como fontes primárias dos íons dissolvidos na água embora o aumento das concentrações de Mg (piroxênios) no período seco pode direcionar para essa associação devido a maior interação da água armazenada com a rocha (augita) e/ou solo (argilominerais).

Figura 31 – Coeficiente de correlação de Pearson entre os valores dos parâmetros físicos e químicos e concentrações de íons (considerando todas as campanhas).

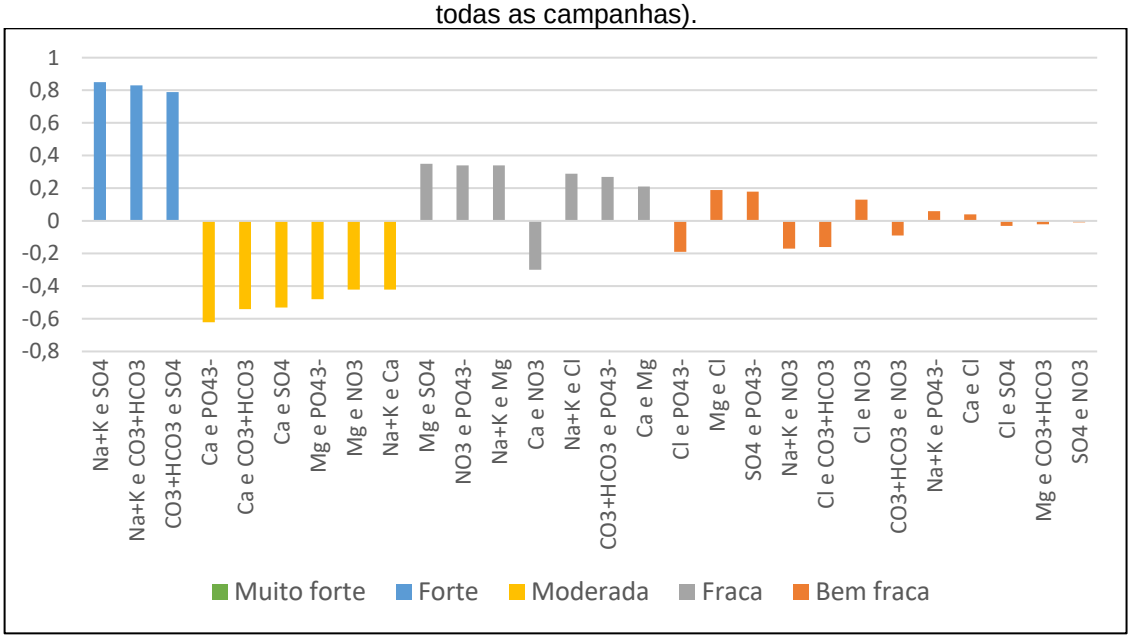


Fonte: elaborado pela autora.

A composição mineralógica do solo também pode influenciar a composição química da água, através da alteração de minerais secundários, uma vez que o maior tempo de contato da água é com o solo. Esta é uma característica importante da hidrologia da AU pois ocorre uma mistura de água meteórica, intersticial e freática. Considerando a composição mineralógica do solo que ocorre na AU estudada (Casagrande, inédito) que apresenta caulinita/haloisita, quartzo, gibbsita, goethita,

hematita, cristobalita, anatásio, clorita-serpentina, ilmenita, montmorilonita-clorita e nontronita, minerais derivados da alteração do diabásio, fica evidente a influência do substrato rochoso e solo na composição da água, visto que as reações de intemperismo químico destes resultam na liberação de cátions para o meio aquoso.

Figura 32 – Coeficiente de correlação de Pearson entre as concentrações de íons (considerando todas as campanhas).



Fonte: elaborado pela autora.

Os argilominerais do solo de alteração do diabásio podem influenciar na composição da água freática através de processos de adsorção, troca iônica e reações químicas que podem resultar em modificações na concentração de íons na água, bem como na liberação ou retenção de elementos químicos. A adsorção ocorre quando os íons presentes na água se ligam à superfície dos argilominerais, enquanto a troca iônica envolve a substituição de íons adsorvidos por outros íons presentes na água.

Os agilominerais do grupo das esmectitas (no caso, montmorilonita e nontronita) tem a capacidade de adsorver e trocar íons (Na+, K+, Ca2+, Mg2+ e H+) com a água, o que pode afetar a composição desta. Além disso, em com o avanço do intemperismo esses minerais também liberam cátions ao serem alterados para caulinita (BRADY; WEIL, 2008).

A clorita e a serpentina também podem interagir com a água freática e liberar íons Fe2+, Fe3+, Mg2+, Al3+ e H+) durante o processo de alteração.

Já a caulinita é um argilomineral que possui baixa capacidade de troca iônica e normalmente representa o produto final do intemperismo.

Esses processos são influenciados pela disponibilidade de água, que foi medida no nível dos poços de monitoramento, e na qualidade da água, determinada pelos parâmetros físicos e químicos (KIRCHNER, 2009). Sendo assim, o tempo de interação da água com a superfície dos minerais, a composição da assembleia mineral e o grau de intemperismo influenciam diretamente a hidroquímica que tende a ser substancialmente diferente da composição da água das chuvas (BROOKS et al., 2015).

Destaca-se que mesmo se configurando uma área úmida, com possível diferenças de ambiente óxido-redutor, a forte sazonalidade e a constituição mineral do solo indicam ambiente oxidante permitindo maior alteração química. Feições de óxido-redução derivadas da remobilização do ferro nos horizontes do solo são características comuns de todos os perfis embora haja presença de cores de baixo croma (< 2) que são indicativos de longo tempo de saturação (VEPRASKAS; LINDBO; LIN, 2012), não foram descritas.

Sobre a influência de fertilizantes do tipo NPK (Nitrogênio, fósforo e potássio) na qualidade da água, a moderada correlação negativa entre PO43- e Ca e PO43- e Mg sugere que a área úmida esteja cumprindo a função de reator biogeoquímico, onde a concentração de PO43- tende a ser controlada pela adsorção deste e precipitação de fosfato de cálcio (Ca3(PO4)2) (XU et al., 2019) e Mg3(PO4)2 e MgHPO4 (LAN et al., 2018), o que também pode corroborar para a baixa concentração de Ca e Mg livres na água.

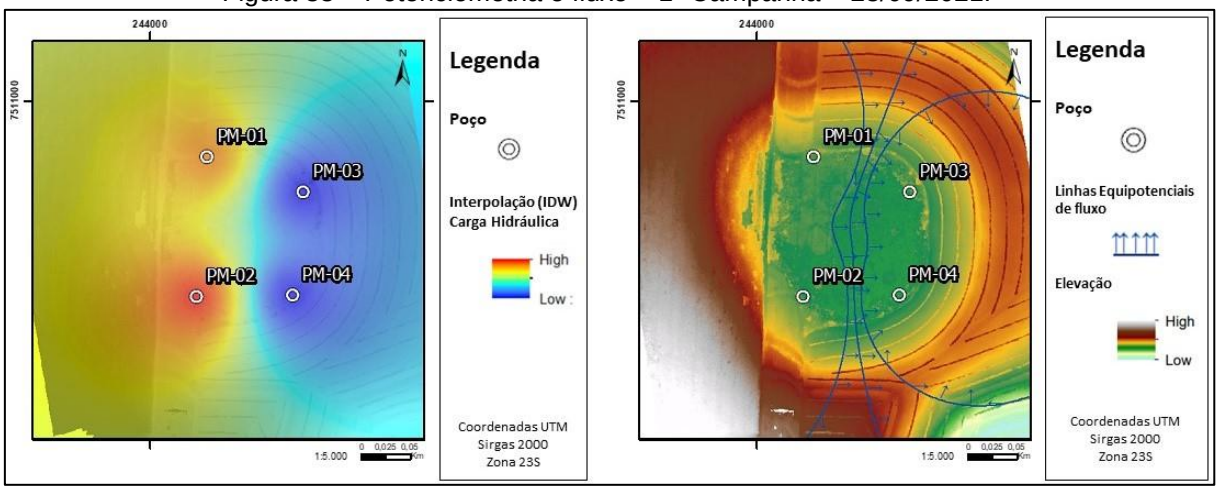
6.2. POTENCIOMETRIA E SENTIDO DE FLUXO DAS ÁGUAS

Os resultados de potenciometria, associados com o mapa de drenagem e topografia visaram estabelecer a relação entre o fluxo e fraturas na rocha ou eixos de drenagem superficial, visto que uma depressão topográfica em posição de interflúvio pode ser gerada e estar orientada sobre linhas de falhas e podem determinar os fluxos preferenciais da água armazenada.

Os resultados de interpolação das cargas hidráulicas demonstraram direção preferencial de fluxo para Leste, com ligeira oscilação para nordeste na 3ª campanha (janeiro - cheia) e para sudeste na 6ª campanha (setembro - estiagem). Sabendo-se

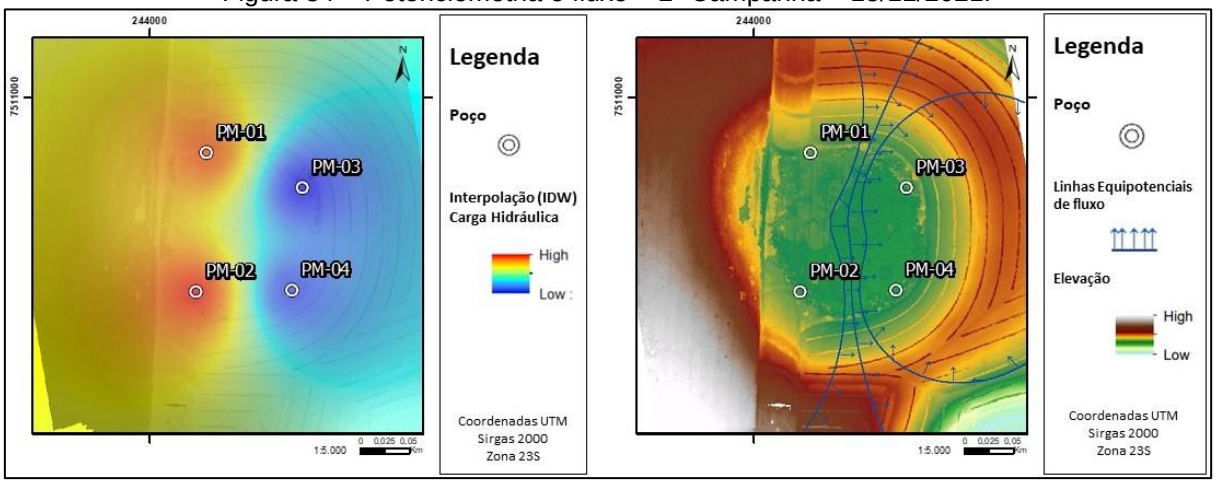
da disposição dos poços de monitoramento na área, o sentido do fluxo parte dos poços PM-01 e PM-02 (a oeste do centro da lagoa) para os PM-03 e PM-04 (a leste do centro da lagoa) (Figuras 33 a 38). É importante também considerar o movimento da água subterrânea por gravidade, visto que em áreas úmidas o lençol freático usualmente é um reflexo moderado da topografia do terreno (KING, 1899).

Figura 33 – Potenciometria e fluxo – 1ª Campanha – 23/09/2021.



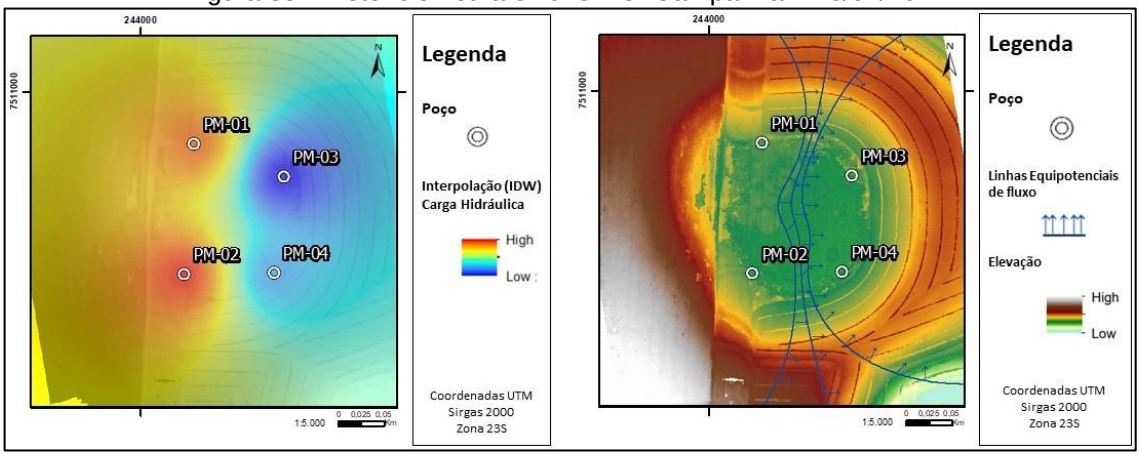
Fonte: elaborado pela autora.

Figura 34 – Potenciometria e fluxo – 2ª Campanha – 15/11/2021.



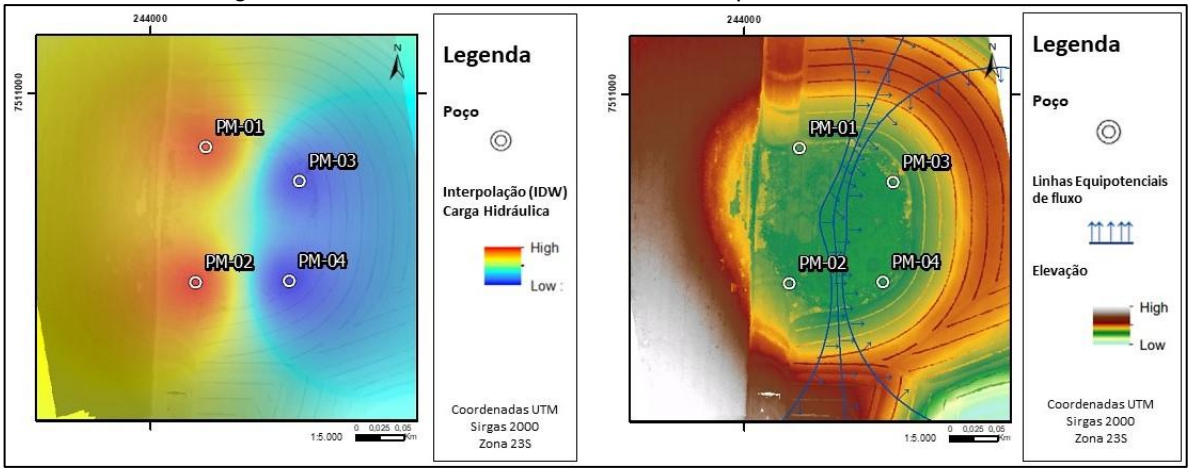
Fonte: elaborado pela autora.

Figura 35 – Potenciometria e fluxo – 3ª Campanha – 26/01/2022.



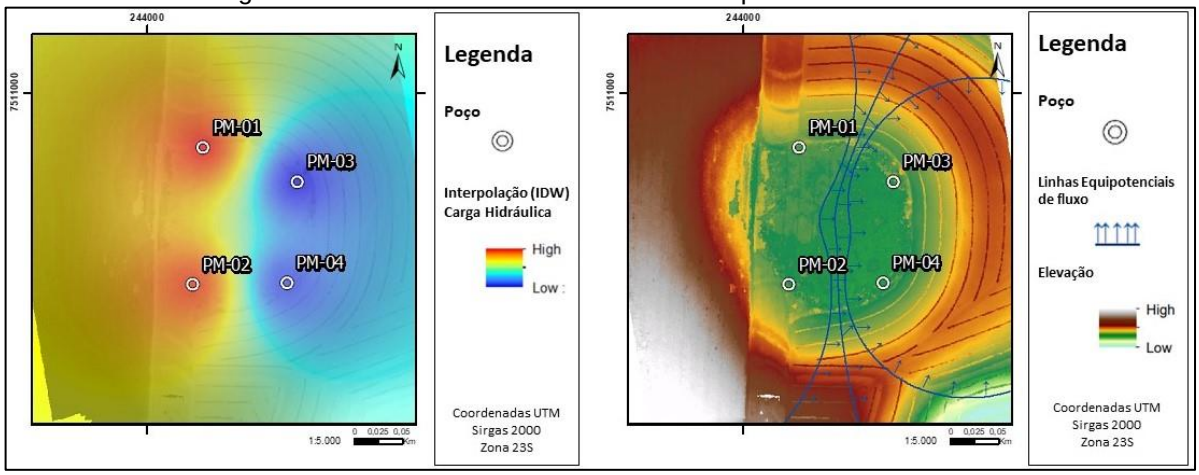
Fonte: elaborado pela autora.

Figura 36 – Potenciometria e fluxo – 4ª Campanha – 23/03/2022.



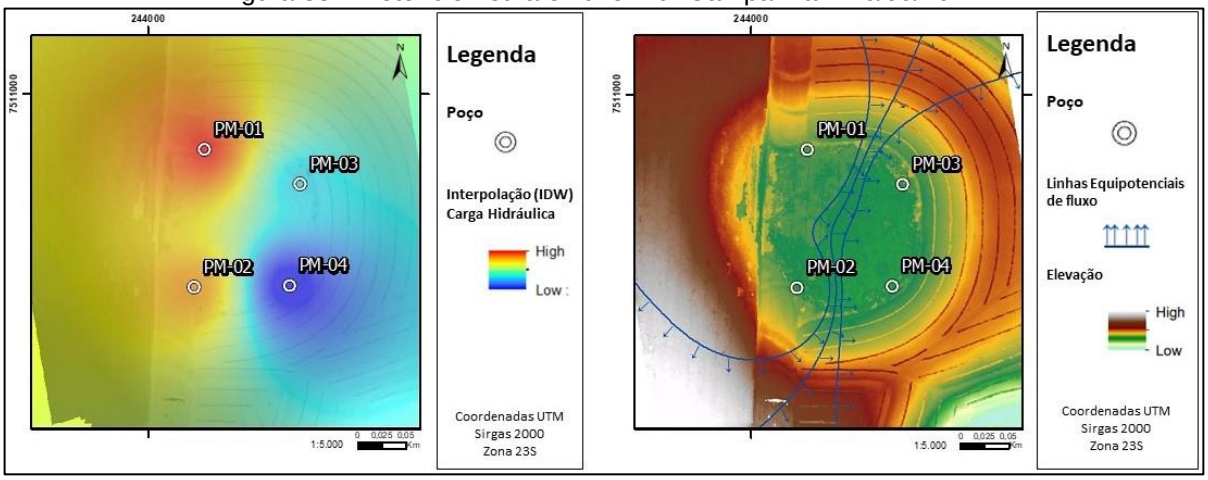
Fonte: elaborado pela autora.

Figura 37 – Potenciometria e fluxo – 5ª Campanha – 27/05/2022.



Fonte: elaborado pela autora.

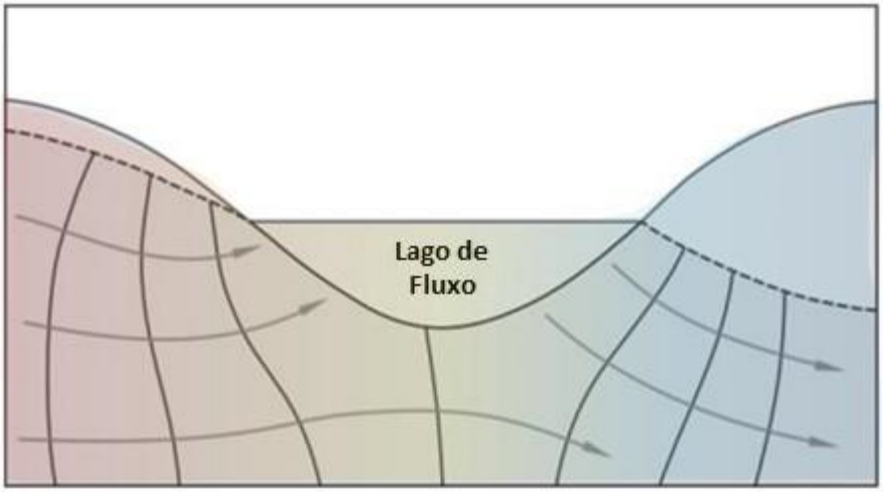
Figura 38 – Potenciometria e fluxo – 6ª Campanha – 16/09/2022.



Fonte: elaborado pela autora.

Com a caracterização do fluxo é possível classificar a feição estudada como um lago de fluxo (Figura 39), onde essa recebe descarga de áreas a montante e atua como zona de recarga para jusante através do escoamento subterrâneo. As áreas úmidas podem receber entradas de fluxo, recarregar os aquíferos ou as duas coisas a depender da flutuação do nível freático que pode avançar e retroceder, descarregando e recarregando, podendo uma mesma área úmida ser zona de descarga em uma época de alto fluxo e uma zona de recarga nos períodos de estiagem.

Figura 39 – Esquema de modelo de fluxo identificado na área de estudo.



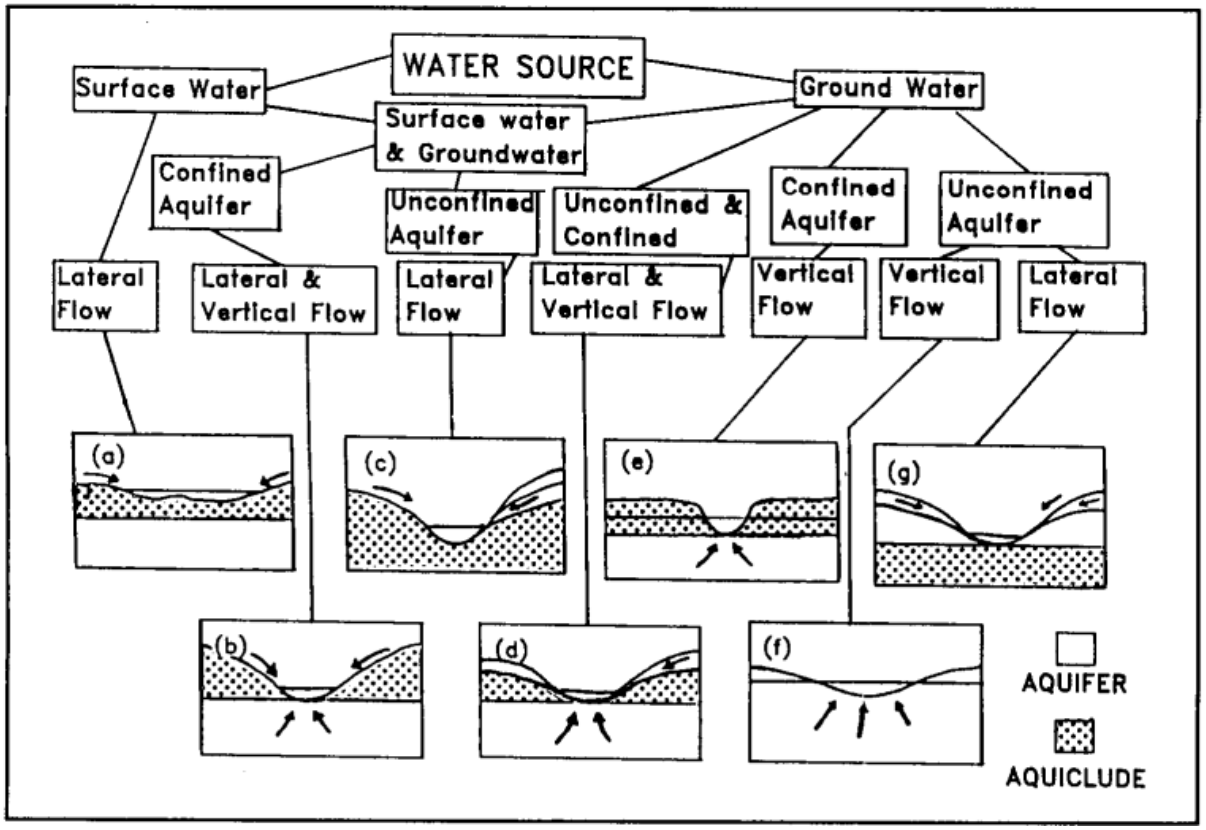
Fonte: Adaptado de Manzione (2015), adaptado de Winter et al. (1998).

O nível d'água raso e as oscilações nos períodos hidrológicos de cheia e seca em uma feição de depressão topográfica isolada sugere que o aquífero estudado seja um aquífero livre, freático, com forte condicionamento e armazenamento de água

meteórica (BARKER; MALTBY, 2009), onde é possível correlacionar aos modelos de entrada de fluxo de água propostos por Gilvear et al. (1989) considerando os modelos (a), (c) e (g) para o fluxo lateral (Figura 40).

Manzione (2015) descreve que as fontes de água para áreas úmidas podem vir da descarga subterrânea em locais onde a superfície do terreno está sob um complexo campo de fluxo subterrâneo, da água subterrânea de nascentes em locais de afloramento do lençol freático, de rios e da precipitação em casos em que as áreas úmidas não possuem fluxos de entrada ou gradiente hidráulico da encosta. Já o fluxo de saída pode deixar as áreas úmidas por evaporação, transpiração, escoamento superficial (podendo ser ponto de origem de córregos), subsuperfícial ou subterrâneo.

Figura 40 – Modelos hidrológicos de fonte de água para áreas úmidas.



Fonte: GILVEAR et al. (1989).

As depressões topográficas fechadas, alagadas ou não, são resultados da evolução das paisagens formadas por processos naturais ou antrópicos (ETIENNE et al., 2011). No caso de evolução natural, como a depressão temporariamente alagada na área de estudo, sem conexão visível com os rios da bacia, a evolução dessa e o

hidroperíodo podem estar diretamente relacionados com o comportamento (fluxo e direção) do aquífero livre que é alimentado pela precipitação.

É importante ressaltar a proximidade com a nascente do Córrego Santa Gertrudes a leste, sugerindo uma conexão em subsuperfície entre os corpos d'água, com a possível disponibilidade de água na nascente ser dependente do fluxo proveniente da lagoa, que atuaria como um sumidouro. Nascentes correspondem a área de descarga natural das águas subterrâneas, encontradas onde o lençol freático está muito perto ou alcança a superfície do solo, podendo a água surgir no terreno quando há contato de camadas impermeáveis com a superfície, por afloramento dos lençóis em áreas de baixada, por falhamentos geológicos, fraturamentos ou canais cársticos. As mais comuns são as de contato, que podem surgir em encostas e sopés de morros ou em depressões, com pontos bem definidos (os chamados olhos d' água) ou áreas difusas formando brejos e charcos a partir da acumulação da água (MANZIONE, 2015).

Os mapas potenciométricos possibilitaram fazer uma primeira simulação do fluxo no aquífero raso, relacionando a área úmida isolada e o Córrego Santa Gertrudes na escala local. Esse aspecto é relevante pois o córrego em questão, cuja vazão pode estar sendo alimentada parcialmente pela área úmida isolada, contribui para a manutenção da segurança hídrica dos municípios de Cordeirópolis e Santa Gertrudes que enfrentam recorrente escassez hídrica nos períodos sazonais de seca. Contudo, para estabelecer a relação espaço-temporal entre o fluxo da área úmida e o córrego é necessário quantificar o tempo de residência da água do solo e do aquífero raso (BROOKS et al., 2015). Além disso, o fato do aquífero ser bastante raso na área úmida, parte da água intersticial é provavelmente absorvida pelas raízes das plantas conferindo grande importância na caracterização da estrutura e função ecológica, e adicionalmente pode contribuir com a regulação da vazão dos fluxos de superfície (MIGUEZ-MACHO; FAN, 2012).

6.3. MORFOLOGIA DA DEPRESSÃO TOPOGRÁFICA.

Com as imagens do modelo digital de elevação combinados com análise de fluxo da água na lagoa, observa-se que a feição de estudo corresponde a uma depressão topográfica isolada, não exibindo conexão com drenagens em superfície,

embora essa conexão também possa ocorrer um subsuperfície (TINER, 2003) (Figura 41).

Com base na bibliografia estudada é possível traçar semelhanças entre as formas de drenagem e relevo da área úmida estudada com as abordagens de fluxo e padrões de drenagem descritos por Christofoletti (1974), com as feições cársticas abordadas por Piló (2000) e com as cabeceiras de drenagem e depressões fechadas estudadas por Guareschi (2018).

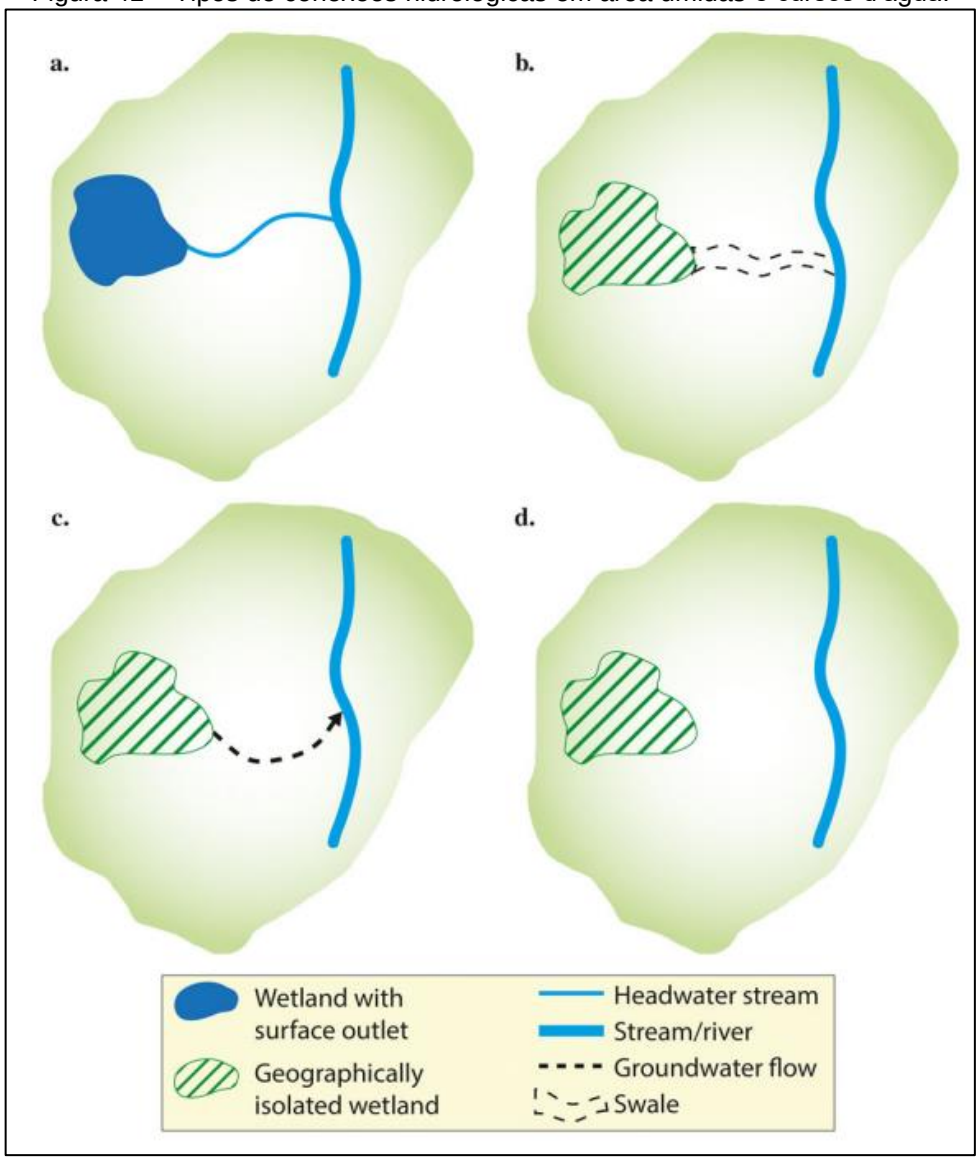
A área úmida estudada mostra semelhança com as formas denominadas de dolinas, devido ao seu caráter circular e depressão topográfica, sem conexões superficiais. A gênese de dolinas está relacionada inicialmente a circulação da água em zonas de descontinuidades estruturais por onde começa o ataque químico normalmente em subsuperfície e físico (remoção de materiais), em terrenos que favorecem os fluxos superficiais de água Piló (2000). Dentre os subtipos de dolinas, destaca-se a semelhança com as chamadas “dolinas de dissolução” de Jennings (1985) que ocorrem quando se inicia a dissolução em pontos mais susceptíveis da rocha (fraturas, juntas, planos de acamamento) formando pequenas depressões.

Visto a possível associação com zonas de fraturas e relevo pseudo-cárstico, torna-se imprescindível analisar a feição não apenas localmente, mas em conjunto com a paisagem em que está inserida, procurando associá-la com outras depressões, drenagens, córregos, vertentes e demais feição próximas, a fim de se obter um panorama da dinâmica fluvial em que esta feição está inserida, assim como nos casos dos carstes poligonais descritos por Williams (1971) e depressões compostas de White (1988).

Como visto na seção de geomorfologia da área de estudo, o padrão de drenagem é descrito como dendrítico, típico de paisagem com camadas majoritariamente horizontais (como as camadas sedimentares da bacia do paraná e os sills da Formação Serra Geral), favorecendo assim o encaixe dos corpos d’água em zonas de fraqueza da rocha, como em fraturas e em zonas de contato (usualmente fraturado) com as demais litologias sedimentares da bacia do paraná (regionalmente ocorrendo as Formações Corumbataí e Pirambóia), possibilitando assim a dissolução incongruente ao longo das fraturas provocando zonas preferenciais ao encaixe das drenagens e o surgimento de feições pseudo-cársticas.

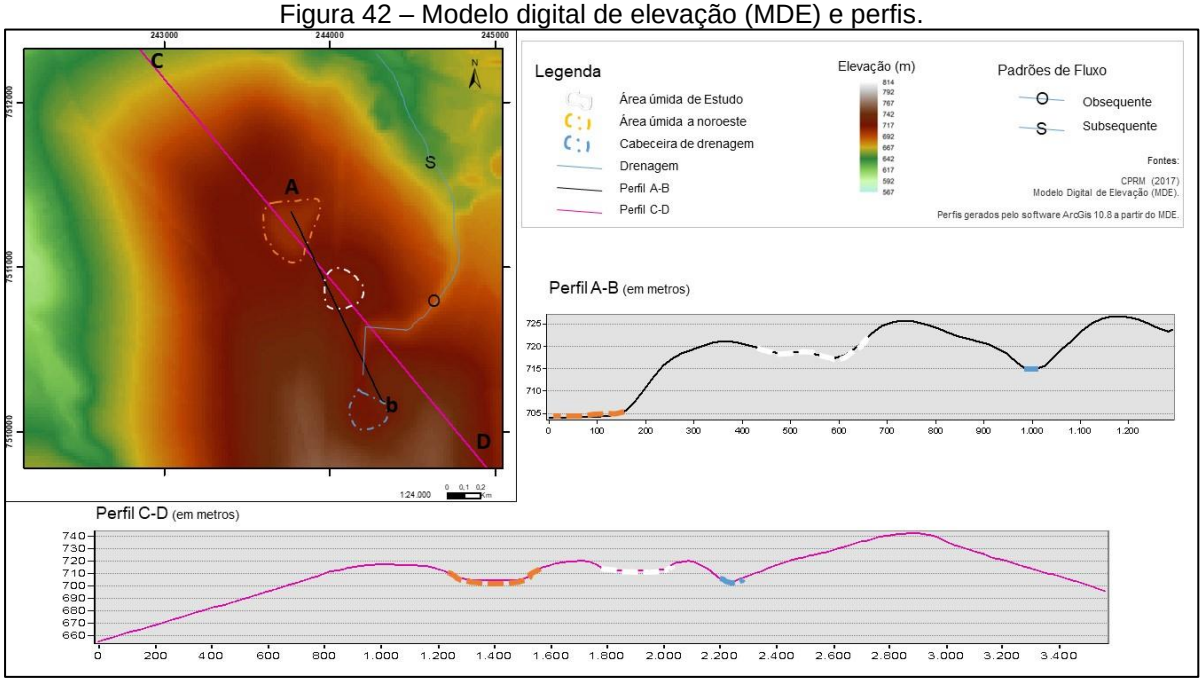
Como pode ser observado da Figura 42, a área de estudo está localizada em uma região topograficamente mais elevada que seu entorno, condicionada pela ocorrência de diabásio da Formação Serra Geral, conectada com as partes mais baixas (camadas sedimentares Fm. Corumbataí e Pirambóia) através de vertentes de declividade de até 20° de onde surgem drenagens que cortam perpendicularmente as camadas litológicas, podendo ser identificada como um fluxo obsequente que desagua em um fluxo subsequente no sopé da escarpa, o Córrego Santa Gertrudes, que segue sentido noroeste ao encontro do Rio Corumbataí (Figura 42).

Figura 41 – Tipos de conexões hidrológicas em área úmidas e cursos d'água.



Fonte: Leibowitz et al. (2018).

Figura 42 – Modelo digital de elevação (MDE) e perfis.

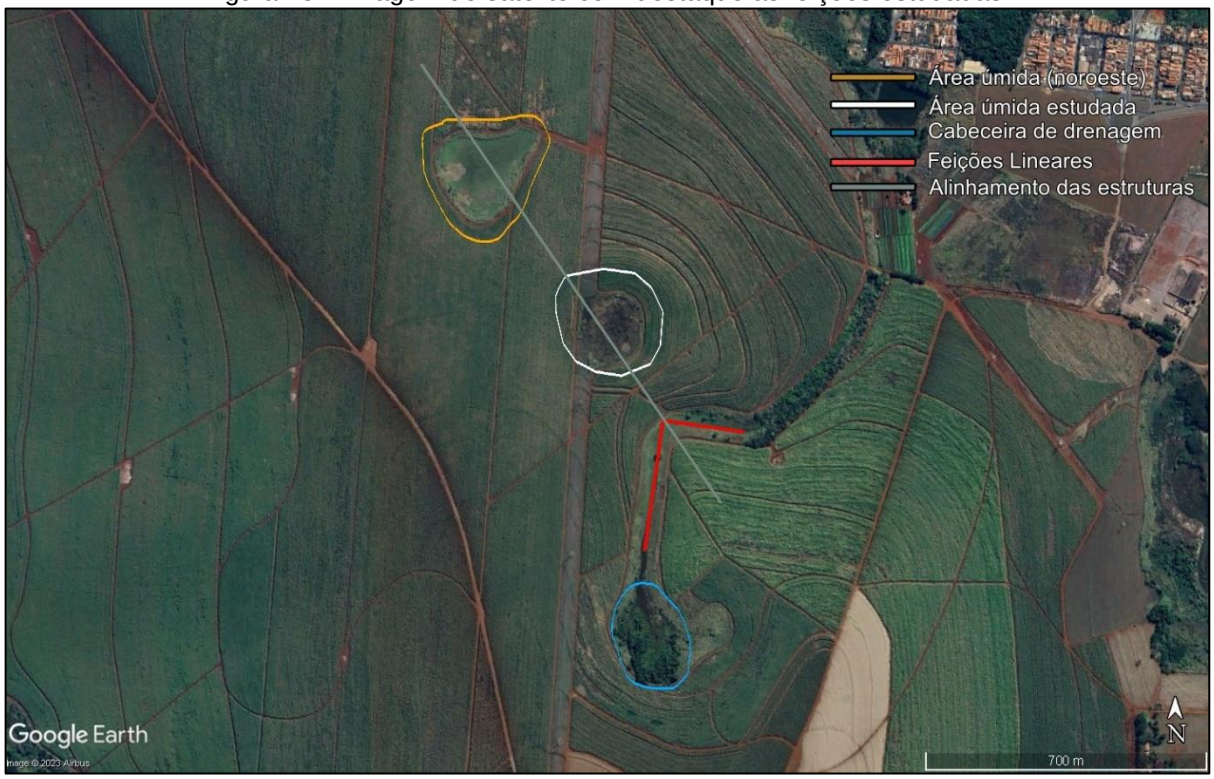


Fonte: elaborado pela autora.

Percebe-se também a proximidade da área úmida estudada (semelhante a uma dolina), com a nascente do Córrego Santa Gertrudes, ao sul, e com outra depressão isolada e alongada a noroeste (Figuras 42 e 43). Destaca-se a forma de relevo, que se assemelha as outras duas depressões e pode ser caracterizada como uma cabeceira de drenagem que compõe a nascente do Córrego Santa Gertrudes. Como abordado por Guareschi (2018), é possível que cabeceiras de drenagem sejam o estágio final da evolução de uma paisagem composta também pelas depressões fechadas em áreas que podem ter grande densidade de fraturamento, cenário que também pode ser observado no presente estudo, como evidenciado por Casagrande et al. (2021).

Além disso, o modelo de tipos de conexões hidrológicas entre áreas úmidas não alagadas e riachos ou rios de Leibowitz et al. (2018) também exemplifica a evolução do terreno e a possível interação entre esses corpos d'água, mostrando como uma área úmida isolada pode contribuir para jusante através água subterrânea, principalmente nos casos que esta AU esteja margeando riachos de primeira ordem, onde tendem a receber maior volume de água do que AUs próximas a corpos d'água de ordem superior (WHIGHAM; CHITTERLING; PALMER, 1988).

Figura 43 – Imagem de satélite com destaque as feições estudadas.



Fonte: modificado de (GOOGLE LLC, 2022).

Também é possível notar que a feição a noroeste se assemelha a uma uvala e mostra alongamento perpendicular ao declive e paralelo a drenagem obsequente que dá origem ao córrego Santa Gertrudes, o que parece ser um estágio intermediário do entalhamento de uma drenagem no terreno, consistente com as observações de Guareschi (2018).

Vale relembrar que por definição, a uvala é uma feição característica de terrenos que favorecem os fluxos superficiais de água, originando uma feição com formato mais alongado e indicando a evolução morfológica do relevo (PILÓ, 2000).

Analisando essas feições de forma integrada, é possível traçar correlações com o modelo de depressões compostas proposto por White (1988), em que o córrego seria o a cabeceira e ressurgência, a dolina seria o sumidouro e a uvala seria uma forma intermediaria. Os perfis da Figura 42 evidenciam o caráter topograficamente mais elevado da área de estudo (em branco), que atuaria como um sumidouro para a drenagem do córrego.

Destaca-se também o comportamento linear do curso d´água na nascente do córrego (Figura 43), evidenciado pela abrupta mudança de sentido formando ângulo reto, cuja interseção está alinhada em superfície com as feições mencionadas

anteriormente, com pouca diferença de cota topográfica, como apontam os perfis da Figura 44, o que sustenta a possibilidade da ocorrência de fraturas no substrato rochoso que possibilitam a dissolução da rocha e subsidência da cobertura do solo provocando o surgimento de tais feições.

Ressalta-se por fim que cabeceiras de drenagem, nascentes, são consideradas Áreas de Preservação Permanente (APP), acordo com a Lei nº12.651/2012 do Cód. Florestal devido a importância dessa configuração para a manutenção dos recursos hídricos, sendo assim, observando a interação das depressões com a drenagem em questão, é possível levantar a necessidade de preservação que essas áreas, usualmente negligenciadas, requerem.

7. CONCLUSÃO

Os resultados de análises físico-químicas e de composição das águas, mapa de fluxo e estudo sobre a gênese de depressões permitiram um melhor entendimento do contexto ecológico em que se encontra a área de estudo e permitiu a geração de hipóteses sobre sua função hidrogeológica e social, visto sua possível interação com a nascente do Córrego Santa Gertrudes, responsável pelo abastecimento da cidade de mesmo nome.

As principais conclusões a respeito da hidroquímica na AU foram:

- Os resultados de nível d'água apresentaram variações entre o período de chuvas e estiagem, sugerindo que a área úmida recebe contribuição diretamente de água da chuva;
- Os valores de condutividade elétrica (superiores a 100 µS/cm) podem indicar que os poços PM-01 e PM-02 (montante) estejam recebendo e retendo os sais oriundos do cultivo circundante devido ao escoamento superficial;
- As amostras foram, em maioria, classificadas como Sódicas Bicarbonatadas;
- Foi observada a influência sazonal nas concentrações. A concentração média máxima de bicarbonato e carbonato obtiveram seu pico máximo durante o período de chuvas, enquanto as concentrações médias de sódio e cloreto obtiveram seu pico ao final e durante os períodos de estiagem, respectivamente;

- A correlação forte positiva entre os íons Na (plagioclásio), HCO3+CO3, e SO4 (sulfetos) e a condutividade elétrica (Ce) e entre si entre si sugere que estes estão sendo liberados para a água simultaneamente devido a alteração dos minerais presentes no diabásio e no solo;
- Os baixos teores dos cátions Ca e Mg sugerem a não dominância do saprólito ou da rocha como fontes primárias dos íons dissolvidos na água embora o aumento das concentrações de Mg (piroxênios) no período seco pode direcionar para essa associação;
- A forma de uso e ocupação do solo também pode ser a fonte de alguns íons e compostos através do uso de agroquímicos como fertilizantes (NPK, nitrogênio-fósforo-potássio), nutrientes, pesticidas, sais, metais, entre outros;
- A moderada correlação negativa entre PO43- e Ca, e PO43- e Mg sugere que concentração de PO43- possa estar controlada pela adsorção deste e precipitação de fosfato de cálcio (Ca3(PO4)2) e Mg3(PO4)2 e MgHPO4.

Já sobre as análises de fluxo foi possível concluir que:

- A interpolação das cargas hidráulicas e posterior mapa de fluxo demonstraram direção preferencial de fluxo para Leste, partindo dos poços PM-01 e PM-02 (a oeste do centro da lagoa) para os PM-03 e PM-04 (a leste do centro da lagoa);
- A caracterização do fluxo sugere que feição estudada atue como um lago de fluxo recebendo descarga de áreas a montante e recarregando a jusante;
- O nível d'água raso e as oscilações nos períodos hidrológicos de cheia e seca sugere que o aquífero estudado seja um aquífero livre, freático, com forte condicionamento e armazenamento de água meteórica.

Sobre a gênese e estrutura da AU foi importante perceber que:

- A feição de estudo corresponde a uma depressão topográfica isolada, não exibindo conexão com drenagens em superfície, embora essa conexão possa ocorrer em subsuperfície;
- O entorno da AU estudada apresenta importantes feições morfológicas como a nascente do Córrego Santa Gertrudes (cabeceira de drenagem), ao sul, e outra depressão isolada e alongada a noroeste;

- É possível traçar correlação morfológicas entre a AU estudada (sumidouro) e feições de seu entorno com modelos de pseudo-carstes poligonais e depressões compostas;
- A coexistência dessas feições pode mostrar como uma área úmida isolada pode contribuir interagir e contribuir com seu entorno através da água subterrânea;
- O comportamento linear do curso d´água na nascente do córrego sustenta a possibilidade da ocorrência de fraturas no substrato rochoso que possibilitam a dissolução incongruente da rocha e subsidência da cobertura do solo provocando o surgimento das depressões topográficas.

Por fim, é importante ressaltar que existem diversas ferramentas e modelagens capazes de ampliar os conhecimentos a respeito da dinâmica hídrica em áreas úmidas que podem ser campo de estudo para pesquisas posteriores, destacando-se a quantificação do tempo de residência da água subterrânea e o estudo de isótopos para investigar processos hidrológicos e geoquímicos, visando fornecer informações mais detalhadas sobre a origem, fluxo e evolução da água nessas áreas.

8. REFERÊNCIAS

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR9898: Preservação e técnicas de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores**. Rio de Janeiro, 1987.

AKOGLU, Haldun. User's guide to correlation coefficients. **Turkish Journal of Emergency Medicine**, *[S. l.]*, v. 18, n. 3, p. 91–93, 2018. DOI: 10.1016/J.TJEM.2018.08.001. Acesso em: 9 jun. 2023.

ALMEIDA, F. F. M. De; HASUI, Y.; PONÇANO, W. L.; DANTAS, A. S. L.; CARNEIRO, C. D. R.; MELO, M. S. De; BISTRICHI, C. A. Mapa geológico do estado de São Paulo. **IPT-Série Monografias**, *[S. l.]*, v. 6, 1981.

ALMEIDA, Flávio Marques De. Fundamentos geológicos do relevo paulista. **Revista do Instituto Geológico, São Paulo**, *[S. l.]*, v. 39, n. 3, p. 9–75, 2018.

ALVARES, Clayton Alcarde; STAPE, José Luiz; SENTELHAS, Paulo Cesar; GONÇALVES, J. L. de M.; SPAROVEK, Gerd. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische zeitschrift**, *[S. l.]*, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

ANALYSER, Comércio e Indústria Ltda. Fotômetro de chama digital microprocessado. *Em*: **Manual De Instruções 910ms**. São Paulo. p. 20, 2010.

APHA, American Public Health Association. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. [s.l.] : American public health association Washington, DC, 2012. v. 10

BAKKER, Mark; POST, Vincent. **Analytical Groundwater Modeling: Theory and Applications Using Python**. [s.l.] : CRC Press, 2022.

BARBIÉRO, Laurent; DE QUEIROZ NETO, José P.; CIORNEI, Gilles; SAKAMOTO, Arnaldo Y.; CAPELLARI, Benjamin; FERNANDES, Erminio; VALLES, Vincent. Geochemistry of water and ground water in the Nhecolândia, Pantanal of Mato Grosso, Brazil: variability and associated processes. **Wetlands**, *[S. l.]*, v. 22, n. 3, p. 528–540, 2002.

BARKER, Tom; MALTBY, Edward. **The Wetlands Handbook**. [s.l.] : John Wiley & Sons, 2009.

BIGARELLA, João José; BECKER, Rosemari Dora; SANTOS, G. F. Dos; PASSOS, E.; SUGUIO, Kenitiro. Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais. *[S. l.]*, 1994.

BLACKWELL, Martin S. A.; PILGRIM, Emma S. Ecosystem services delivered by small-scale wetlands. **Hydrological Sciences Journal**, *[S. l.]*, v. 56, n. 8, p. 1467–1484, 2011.

BLUM, Alex E.; STILLINGS, Lisa L. Feldspar dissolution kinetics. *Em*: **Chemical weathering rates of silicate minerals**. [s.l.] : De Gruyter, 2018. p. 291–352.

BRADY, Nyle C.; WEIL, Ray R. **The nature and properties of soils**. [s.l.] : Prentice Hall Upper Saddle River, NJ, 2008. v. 13

BROOKS, Paul D.; CHOROVER, Jon; FAN, Ying; GODSEY, Sarah E.; MAXWELL, Reed M.; MCNAMARA, James P.; TAGUE, Christina. Hydrological partitioning in the critical zone: Recent advances and opportunities for developing transferable understanding of water cycle dynamics. **Water Resources Research**, *[S. l.]*, v. 51, n. 9, p. 6973–6987, 2015.

CÂMARA MUNICIPAL DE SANTA GERTRUDES. **Aspectos Gerais**. 2023. Disponível em: https://www.camarasg.sp.gov.br/Pagina/Listar/678. Acesso em: 21 jul. 2023.

CASAGRANDE, Matheus Felipe Stanfoca. **ESTUDO DAS FUNÇÕES HIDROGEOLÓGICAS E ECOLÓGICAS DE ÁREA ÚMIDA GEOGRAFICAMENTE ISOLADA EM REGIÕES DE CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR**. 2023. UNESP, Rio Claro, 2023.

CASAGRANDE, Matheus Felipe Stanfoca; FURLAN, Lucas Moreira; MOREIRA, César Augusto; ROSA, Fernanda Teles Gomes; ROSOLEN, Vania. Non-invasive methods in the identification of hydrological ecosystem services of a tropical isolated wetland (Brazilian study case). **Environmental Challenges**, *[S. l.]*, v. 5, p. 100233, 2021.

CETESB, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Qualidade das águas subterrâneas do estado de São Paulo 2013-2015**. São Paulo. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/aguas-subterraneas/wp-content/uploads/sites/13/2013/11/Cetesb_QualidadeAguasSubterraneas2015_Web_20-07.pdf. Acesso em: 9 jun. 2023.

CETESB, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Relatório Qualidade das Águas Interiores no Estado de São Paulo – 2019: Apêndice E-Significado Ambiental e Sanitário das Variáveis de Qualidade das Águas e dos Sedimentos e Metodologias Analíticas e de Amostragem**. São Paulo. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/12/2018/03/Apendice-E-Significado-Ambiental-e-Sanitario-das-Variaveis-de-Qualidade-2016.pdf. Acesso em: 9 jun. 2023.

CHRISTOFOLETTI, Antonio. **Geomorfologia**. [s.l.] : Editora Blucher, 1974.

CHRISTOFOLETTI, S. R.; MORENO, M. M. T. Sustentabilidade da mineração no polo cerâmico de Santa Gertrudes, São Paulo-Brasil. **Cerâmica Industrial**, *[S. l.]*, v. 16, n. 3, p. 35–42, 2011.

CIIAGRO, Centro Integrado de Informações Agrometereológicas. **Dados Mensais por Período: Cordeirópolis**. 2022. Disponível em: http://www.ciiagro.org.br/cpmensal/pmensal. Acesso em: 19 dez. 2022.

CLARK, Martyn P. et al. Improving the representation of hydrologic processes in Earth System Models. **Water Resources Research**, *[S. l.]*, v. 51, n. 8, p. 5929–5956, 2015.

CLARKSON, Beverley R.; AUSSEIL, Anne-Gaelle E.; GERBEAUX, Philippe. Wetland ecosystem services. **Ecosystem services in New Zealand: conditions and trends. Manaaki Whenua Press, Lincoln**, *[S. l.]*, v. 1, p. 192–202, 2013.

CLEMENTE, C. A.; MARCONI, A. Mineralogia e mobilidade de cátions de uma alteração intempérica de diabásio. **Scientia Agricola**, *[S. l.]*, v. 51, p. 335–344, 1994.

CPRM, Serviço Geológico do Brasil. **Carta de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundação: município de Cordeirópolis, SP**. Rio de Janeiro. Disponível em: https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/17410. Acesso em: 9 jun. 2023.

CUI, Quan; AMMAR, Mohamed E.; IRAVANI, Majid; KARIYEVA, Jahan; FARAMARZI, Monireh. Regional wetland water storage changes: The influence of future climate on geographically isolated wetlands. **Ecological Indicators**, *[S. l.]*, v. 120, p. 106941, 2021.

DA SILVA ALVES, Luciano; MANDOUNÇA, Fabiana Costa; SANTANA, Lucas Muniz; DE ABREU PEREIRA, Ingrid; SANTOS, Aldenor Gomes. Parâmetros de qualidade e distribuição de espécies de carbono inorgânico em águas naturais de lagoas urbanas em Salvador-Ba. **Revista Geama**, *[S. l.]*, v. 6, n. 3, p. 32–39, 2020.

DAHLKE, Helen E.; EASTON, Zachary M.; LYON, Steve W.; WALTER, M. Todd; DESTOUNI, Georgia; STEENHUIS, Tammo S. Dissecting the variable source area concept–subsurface flow pathways and water mixing processes in a hillslope. **Journal of Hydrology**, *[S. l.]*, v. 420, p. 125–141, 2012.

DAVIDSON, N. C.; FINLAYSON, Colin. Earth observation for wetland inventory, assessment and monitoring. **Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems**, *[S. l.]*, v. 17, n. 3, p. 219–228, 2007.

DAVIDSON, Nick C. How much wetland has the world lost? Long-term and recent trends in global wetland area. **Marine and Freshwater Research**, *[S. l.]*, v. 65, n. 10, p. 934–941, 2014.

DE RESENDE, A. V. Agricultura e qualidade da água: contaminação da água por nitrato. *[S. l.]*, 2002.

DIAS, Claudio; DA SILVA, Maria de Fátima; CASARINI, Dorothy Pinati; LEMOS, Mara Magalhães. CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOQUÍMICA E QUALIDADE DO SISTEMA AQÜÍFERO GUARANI EM POÇOS TUBULARES PARA ABASTECIMENTO PÚBLICO NO ESTADO DE SÃO PAULO. **Águas Subterrâneas**, *[S. l.]*, 2002.

DOS SANTOS, Vinícius; GASTMANS, Didier. Composição química da água de chuva em Rio Claro (SP). **Revista do Instituto Geológico (Descontinuada)**, *[S. l.]*, v. 37, n. 2, p. 45–60, 2016.

ESRI, Environmental Systems Research Institute. **ArcGis Pro**. ID da Licença: 7303261929, , 2023.

ETIENNE, David; RUFFALDI, Pascale; GOEPP, Stéphanie; RITZ, Frédéric; GEORGES-LEROY, Murielle; POLLIER, Benoit; DAMBRINE, Etienne. The origin of closed depressions in Northeastern France: A new assessment. **Geomorphology**, *[S. l.]*, v. 126, n. 1–2, p. 121–131, 2011.

FABBROCINO, Silvia; BELLUCCI SESSA, Eliana; DE VITA, Sandro; DI VITO, Mauro Antonio; AVINO, Rosario; MAROTTA, Enrica. A GIS-Based Hydrogeological Approach to the Assessment of the Groundwater Circulation in the Ischia Volcanic Island (Italy). **Frontiers in Earth Science**, *[S. l.]*, 2022.

FILIZOLA, Heloisa F.; BOULET, René. Evolution and opening of closed depressions developed in a quartz-kaolinitic sedimentary substratum at Taubaté basin (São Paulo, Brazil), and analogy to the slope evolution. **Geomorphology**, *[S. l.]*, v. 16, n. 1, p. 77–86, 1996.

FURLAN, Lucas Moreira; FERREIRA, Manuel Eduardo; MOREIRA, César Augusto; DE ALENCAR, Paulo Guilherme; CASAGRANDE, Matheus Felipe Stanfoca; ROSOLEN, Vânia. Satellite, UAV, and Geophysical Data to Identify Surface and Subsurface Hydrodynamics of Geographically Isolated Wetlands: Understanding an Undervalued Ecosystem at the Atlantic Forest-Cerrado Interface of Brazil. **Remote Sensing**, *[S. l.]*, v. 15, n. 7, p. 1870, 2023.

GABRIELLI, Christopher P.; MCDONNELL, J. J.; JARVIS, W. T. The role of bedrock groundwater in rainfall–runoff response at hillslope and catchment scales. **Journal of Hydrology**, *[S. l.]*, v. 450, p. 117–133, 2012.

GARIZI, A. Zare; SHEIKH, V.; SADODDIN, A. Assessment of seasonal variations of chemical characteristics in surface water using multivariate statistical methods.

International Journal of Environmental Science & Technology, *[S. l.]*, v. 8, p. 581–592, 2011.

GASTMANS, Didier; HUTCHEON, Ian; MENEGÁRIO, Amauri Antônio; CHANG, Hung Kiang. Geochemical evolution of groundwater in a basaltic aquifer based on chemical and stable isotopic data: Case study from the Northeastern portion of Serra Geral Aquifer, São Paulo state (Brazil). **Journal of Hydrology**, *[S. l.]*, v. 535, p. 598–611, 2016.

GERIS, Josie; TETZLAFF, Doerthe; MCDONNELL, Jeffrey; SOULSBY, Chris. The relative role of soil type and tree cover on water storage and transmission in northern headwater catchments. **Hydrological Processes**, *[S. l.]*, v. 29, n. 7, p. 1844–1860, 2015.

GILVEAR, D. J.; TELLAM, J. H.; LLOYD, J. W.; LERNER, D. N. The hydrodynamics of East Anglian fen systems. Final report to the Nature Conservancy Council, National Rivers Authority and Broads Authority. Contract Survey No. 88. **Nature Conservancy Council, Peterborough**, *[S. l.]*, 1989.

GOLDHABER, Martin B.; MILLS, Christopher T.; MORRISON, Jean M.; STRICKER, Craig A.; MUSHET, David M.; LABAUGH, James W. Hydrogeochemistry of prairie pothole region wetlands: role of long-term critical zone processes. **Chemical Geology**, *[S. l.]*, v. 387, p. 170–183, 2014.

GOLDICH, Samuel S. A study in rock-weathering. **The Journal of Geology**, *[S. l.]*, v. 46, n. 1, p. 17–58, 1938.

GOOGLE LLC. **Google Earth Pro**. , 2022. Disponível em: https://www.google.com/earth/about/versions/?gl=BR&hl=pt-BR#download-pro. Acesso em: 21 jul. 2023.

GUARESCHI, V. D.; NUMMER, A. V. Relevos cársticos em rochas não calcárias: uma revisão de conceitos. **Geografia do Rio Grande do Sul: Temas em debate. Santa Maria: UFSM**, *[S. l.]*, p. 183–194, 2010.

GUARESCHI, Vinícius Duarte. **Cabeceiras de drenagem no planalto das araucárias, bacia hidrográfica do rio Guassupi-RS: distribuição espacial das**

depressões fechadas, controle estrutural e evolução geomorfológica. 2018. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.

HACH, D. R. 890 Colorimeter procedures manual. **Orientation of Sample Cells**, *[S. l.]*, v. 25, 1997.

HAITJEMA, Henk M. **Analytic element modeling of groundwater flow**. [s.l.] : Elsevier, 1995.

HURLBUT, Cornelius Searle; KLEIN, Cornelis. **Manual of mineralogy (after James D. Dana)**. [s.l.] : Wiley, 1977.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Estimativas da população residente com data de referência 1o de julho de 2020**. 2020. Disponível em: https://ftp.ibge.gov.br/Estimativas_de_Populacao/Estimativas_2020/. Acesso em: 9 jun. 2023.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cordeirópolis (SP) | Cidades e Estados | IBGE**. 2021. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sp/cordeiropolis.html. Acesso em: 9 jun. 2023.

JACKSON, Rhett; THOMPSON, James; KOLKA, Randall. Wetland soils, hydrology, and geomorphology. *Em*: [s.l.] : University of California Press, 2014.

JENNINGS, Joseph Newell. Karst geomorphology. *[S. l.]*, 1985.

JUNK, Wolfgang J. et al. Brazilian wetlands: their definition, delineation, and classification for research, sustainable management, and protection. **Aquatic Conservation: marine and freshwater ecosystems**, *[S. l.]*, v. 24, n. 1, p. 5–22, 2014.

JUNQUEIRA, Deise Aparecida. Princípios da governança ambiental na gestão de recursos hídricos com foco em áreas úmidas (AU's) na Depressão Periférica Paulista. *[S. l.]*, 2021.

KARMANN, Ivo; SADOWSKI, Georg Robert. Evolução e dinâmica atual do sistema cárstico do alto Vale do rio Ribeira de Iguape, sudeste do estado de São Paulo. *[S. l.]*, 1994.

KING, Franklin Hiram. **Principles and conditions of the movements of ground water**. [s.l.] : US Government Printing Office, 1899.

KIRCHNER, James W. Catchments as simple dynamical systems: Catchment characterization, rainfall-runoff modeling, and doing hydrology backward. **Water Resources Research**, *[S. l.]*, v. 45, n. 2, 2009.

KIRK, G. J. D.; KRONZUCKER, HJ4247031. The potential for nitrification and nitrate uptake in the rhizosphere of wetland plants: a modelling study. **Annals of botany**, *[S. l.]*, v. 96, n. 4, p. 639, 2005.

KOŁODYŃSKA-GAWRYSIAK, Renata; POESEN, Jean. Closed depressions in the European loess belt–Natural or anthropogenic origin? **Geomorphology**, *[S. l.]*, v. 288, p. 111–128, 2017.

KOPPEN, W. **Climatologia. México, Fundo de Cultura Econômica**. Fondo de Cultura Econômica, Mexico City, Mexico, , 1931.

LAN, Wei; ZHANG, Jian; HU, Zhen; JI, Mingde; ZHANG, Xinwen; ZHANG, Jianda; LI, Fazhan; YAO, Guoqing. Phosphorus removal enhancement of magnesium modified constructed wetland microcosm and its mechanism study. **Chemical Engineering Journal**, *[S. l.]*, v. 335, p. 209–214, 2018.

LEIBOWITZ, Scott G.; VINING, Kevin C. Temporal connectivity in a prairie pothole complex. **Wetlands**, *[S. l.]*, v. 23, n. 1, p. 13–25, 2003.

LEIBOWITZ, Scott G.; WIGINGTON JR, Parker J.; SCHOFIELD, Kate A.; ALEXANDER, Laurie C.; VANDERHOOF, Melanie K.; GOLDEN, Heather E. Connectivity of streams and wetlands to downstream waters: an integrated systems framework. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, *[S. l.]*, v. 54, n. 2, p. 298–322, 2018.

LIN, Ying-Feng; JING, Shuh-Ren; LEE, Der-Yuan; CHANG, Yih-Feng; SUI, Hsuan-Yu. Constructed Wetlands for Water Pollution Management of Aquaculture Farms Conducting Earthen Pond Culture. **Water Environment Research**, *[S. l.]*, v. 82, n. 8, p. 759–768, 2010. DOI: 10.2175/106143010X12609736966685.

LORETI JUNIOR, Roberto; SARDOU FILHO, Ruben; CALTABELOTI, Fabrizio Prior. **Projeto polo cerâmico de Santa Gertrudes: estado de São Paulo**. [s.l.] : CPRM, 2014.

MACHADO, Fabio Braz; NARDY, Antonio José Ranalli; DE MELO, Rodrigo Prudente; DE OLIVEIRA, Marcos Aurélio Farias; SQUISATO, Eloiza. As rochas intrusivas da formação Serra Geral na porção leste da bacia do Paraná no estado de São Paulo: aspectos petrográficos e geoquímicos–resultados preliminares. **Geosciences= Geociências**, *[S. l.]*, v. 24, n. 1, p. 5–17, 2005.

MACIEL FILHO, Carlos Leite; NUMMER, Andrea Valli; DA SILVA, José Luiz Silvério; SANGOI, Dionísio Saccol; DESCOVI FILHO, Leônidas. Feições de carste sobre a formação Serra Geral na região de Vacaria, RS, e Lages, SC. **Revista Caminhos de Geografia. Uberlândia**, *[S. l.]*, v. 14, n. 48, p. 197–208, 2013.

MANZIONE, Rodrigo Lilla. **Águas Subterrâneas**. [s.l.] : Paco Editorial, 2015.

MARTON, John M.; CREED, Irena F.; LEWIS, David B.; LANE, Charles R.; BASU, Nandita B.; COHEN, Matthew J.; CRAFT, Christopher B. Geographically isolated wetlands are important biogeochemical reactors on the landscape. **Bioscience**, *[S. l.]*, v. 65, n. 4, p. 408–418, 2015.

MELTON, J. R. et al. Present state of global wetland extent and wetland methane modelling: conclusions from a model inter-comparison project (WETCHIMP). **Biogeosciences**, *[S. l.]*, v. 10, n. 2, p. 753–788, 2013.

MENEZES, João Paulo Cunha De; BERTOSSI, Ana Paula Almeida; SANTOS, Alexandre Rosa; NEVES, Mirna Aparecida. Correlação entre uso da terra e qualidade da água subterrânea. **Engenharia Sanitária e ambiental**, *[S. l.]*, v. 19, p. 173–186, 2014.

MIGUEZ-MACHO, Gonzalo; FAN, Ying. The role of groundwater in the Amazon water cycle: 2. Influence on seasonal soil moisture and evapotranspiration. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, *[S. l.]*, v. 117, n. D15, 2012.

MILANI, E. J.; MELO, J. H. G.; SOUZA, P. A.; FERNANDES, L. A.; FRANÇA, A. B. Bacia do Paraná: Boletim de Geociências da PETROBRAS, v. 15. *[S. l.]*, 2007.

MITSCH, William J.; GOSSELINK, James G.; ZHANG, Li; ANDERSON, Christopher J. **Wetland ecosystems**. [s.l.] : John Wiley & Sons, 2009.

MÖBUS, Gilberto. **QualiGraf**. Departamento de Recursos Hídricos da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos – FUNCEME, , 2014. Disponível em: www.funceme.br. Acesso em: 22 jul. 2023.

MOSIMANE, Keotshephile et al. Variability in chemistry of surface and soil waters of an evapotranspiration-dominated flood-pulsed wetland: solute processing in the Okavango Delta, Botswana. **Water SA**, *[S. l.]*, v. 43, n. 1, p. 104–115, 2017.

NELSON, Monique LaPerriere; RHOADES, Charles C.; DWIRE, Kathleen A. Influence of bedrock geology on water chemistry of slope wetlands and headwater streams in the southern Rocky Mountains. **Wetlands**, *[S. l.]*, v. 31, p. 251–261, 2011.

PCJ, Comitê das Bacias Hidrográficas dos rios Piracicaba Capivari e Jundiaí. **Relatório Síntese: Plano de Recursos Hídricos das Bacias Hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí, 2020 a 2035. Porto Alegre: Consórcio Profill-Rhama PCJ, 2020**. , 2020. Disponível em: https://agua.org.br/biblioteca/relatorio-sintese-pbh- -pcj/. Acesso em: 2 jan. 2023.

PILÓ, Luís B. Geomorfologia cárstica (Revisão de Literatura). **Revista Brasileira de Geomorfologia**, *[S. l.]*, v. 1, n. 1, 2000.

RAUT, Rosha; SHARMA, Subodh; BAJRACHARYA, Rosha M.; SHARMA, Chhatra Mani; GURUNG, Smriti. Physico-chemical characterization of Gosainkunda Lake. **Nepal Journal of Science and Technology**, *[S. l.]*, v. 13, n. 1, p. 107–114, 2012.

ROCHA, Gerôncio et al. Mapa de águas subterrâneas do Estado de São Paulo. **Águas Subterrâneas**, *[S. l.]*, 2006.

ROGERSON, Peter A. **Métodos estatísticos para geografia: um guia para o estudante**. [s.l.] : Bookman Editora, 2012.

ROSS, J. L. S. Geomorfologia: ambiente e planejamento. São Paulo Contexto.-, 2006. **Ecogeografia do Brasil**, *[S. l.]*, 1990.

ROSSI, M. **Mapa pedológico do estado de São Paulo: revisado e ampliado. São Paulo: Instituto Florestal, 2017**. E-book, , 2017.

RUSSELL, Kimberley N.; BEAUCHAMP, Vanessa B. Plant species diversity in restored and created Delmarva Bay wetlands. **Wetlands**, *[S. l.]*, v. 37, p. 1119–1133, 2017.

SCHLESINGER, William H. Better living through biogeochemistry. **Ecology**, *[S. l.]*, v. 85, n. 9, p. 2402–2407, 2004.

SCHNEIDER, RiL; MÜHLMANN, Hilton; TOMMASI, E.; MEDEIROS, R. A. De; DAEMON, Roberto Ferreira; NOGUEIRA, A. A. Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná. *Em*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA 1974, **Anais** [...]. [s.l: s.n.] p. 41–65.

SEADE, Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados. **SEADE MUNICÍPIOS - Economia**. 2020. Disponível em: https://municipios.seade.gov.br/economia/. Acesso em: 21 jul. 2023.

SEADE, Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados. **Índice Paulista de Desenvolvimento Municipal - IPDM**. São Paulo. Disponível em: https://repositorio.seade.gov.br/dataset/indice-paulista-de-desenvolvimento-municipal-ipdm. Acesso em: 21 jul. 2023.

SEMENIUK, C. A.; SEMENIUK, V. A comprehensive classification of inland wetlands of Western Australia using the geomorphic-hydrologic approach. **Journal of the Royal Society of Western Australia**, *[S. l.]*, v. 94, n. 3, p. 449, 2011.

SHIKAMURA, Silvia E. **Interpretação do coeficiente de correlação**. 2006. Disponível em: http://leg.ufpr.br/~silvia/CE003/node74.html. Acesso em: 9 jun. 2023.

SILVA, A. F.; QUARTEZANI, W. Z.; ZIMBACK, C. R. L.; LANDIM, P. M. B. Aplicação da geoestatística em ciências agrárias. **Botucatu, SP: FEPAF**, *[S. l.]*, 2011.

SOARES, P. C.; LANDIM, P. M. B. Aspectos regionais da estratigrafia da Bacia do Paraná no seu flanco nordeste. *Em*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA 1973, **Anais** [...]. [s.l: s.n.] p. 243–256.

SOARES, Paulo C.; LANDIM, Paulo M. B.; FULFARO, V. J.; SOBREIRO NETO, A. F. Ensaio de caracterizaç ao estratigráfica do Cretáceo no Estado de Sao Paulo: Grupo Bauru. **Rev. Bras. Geociênc**, *[S. l.]*, v. 10, n. 3, 1980.

TAHMASEBI NASAB, Mohsen; SINGH, Vishal; CHU, Xuefeng. SWAT modeling for depression-dominated areas: how do depressions manipulate hydrologic modeling? **Water**, *[S. l.]*, v. 9, n. 1, p. 58, 2017.

TINER, Ralph W. Geographically isolated wetlands of the United States. **Wetlands**, *[S. l.]*, v. 23, n. 3, p. 494–516, 2003.

TODD, David Keith. **Groundwater Hydrology**. New York: John Wiley & Sons, 1980.

TRANTER, Martyn; BROWN, Giles; RAISWELL, Robert; SHARP, Martin; GURNELL, Angela. A conceptual model of solute acquisition by Alpine glacial meltwaters. **Journal of Glaciology**, *[S. l.]*, v. 39, n. 133, p. 573–581, 1993.

TRAVASSOS, Luiz Eduardo Panisset. **Princípios de carstologia e geomorfologia cárstica**. [s.l.] : Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, 2019.

VANDERHOOF, Melanie K.; ALEXANDER, Laurie C. The role of lake expansion in altering the wetland landscape of the Prairie Pothole Region, United States. **Wetlands**, *[S. l.]*, v. 36, p. 309–321, 2016.

VELOSO, H. P.; GOES FILHO, L. Fitogeografia Brasileira—Classificaçao Fisionômico-Ecológica da Vegetaçao Neotropical, Série Vegetaçao, Projeto RADAM Brasil. **Boletim Técnico, Brasılia**, *[S. l.]*, 1982.

VEPRASKAS, M. J.; LINDBO, D. L.; LIN, H. Redoximorphic features as related to soil hydrology and hydric soils. **Hydropedology: synergistic integration of soil science and hydrology**, *[S. l.]*, p. 143–172, 2012.

WADA, Yoshihide; VAN BEEK, L. P. H.; VIVIROLI, Daniel; DÜRR, Hans H.; WEINGARTNER, Rolf; BIERKENS, Marc F. P. Global monthly water stress: 2. Water demand and severity of water stress. **Water Resources Research**, *[S. l.]*, v. 47, n. 7, 2011.

WHIGHAM, Dennis F.; CHITTERLING, Carin; PALMER, Brian. Impacts of freshwater wetlands on water quality: a landscape perspective. **Environmental management**, *[S. l.]*, v. 12, p. 663–671, 1988.

WHITE, William B. Geomorphology and hydrology of karst terrains. *[S. l.]*, 1988.

WILLIAMS, Paul W. Illustrating morphometric analysis of karst with examples from New Guinea. **Zeitschrift für Geomorphologie**, *[S. l.]*, v. 15, n. 1, p. 40–61, 1971.

WU, Yanfeng; SUN, Jingxuan; XU, Y. Jun; ZHANG, Guangxin; LIU, Tao. Projection of future hydrometeorological extremes and wetland flood mitigation services with different global warming levels: A case study in the Nenjiang river basin. **Ecological Indicators**, *[S. l.]*, v. 140, p. 108987, 2022.

XU, Rui; ZHANG, Yong; LIU, Rong; CAO, Yun; WANG, Guoxiang; JI, Lingchen; XU, Yifan. Effects of different substrates on nitrogen and phosphorus removal in horizontal subsurface flow constructed wetlands. **Environmental Science and Pollution Research**, *[S. l.]*, v. 26, p. 16229–16238, 2019.

ZERNITZ, Emilie R. Drainage patterns and their significance. **The Journal of Geology**, *[S. l.]*, v. 40, n. 6, p. 498–521, 1932.

ZOU, Yuanchun; DUAN, Xun; XUE, Zhenshan; MINGJU, E.; SUN, Mingyang; LU, Xianguo; JIANG, Ming; YU, Xiaofei. Water use conflict between wetland and agriculture. **Journal of environmental management**, *[S. l.]*, v. 224, p. 140–146, 2018.

ANEXO A – DESCRIÇÃO E MORFOLOGIA DO SOLO

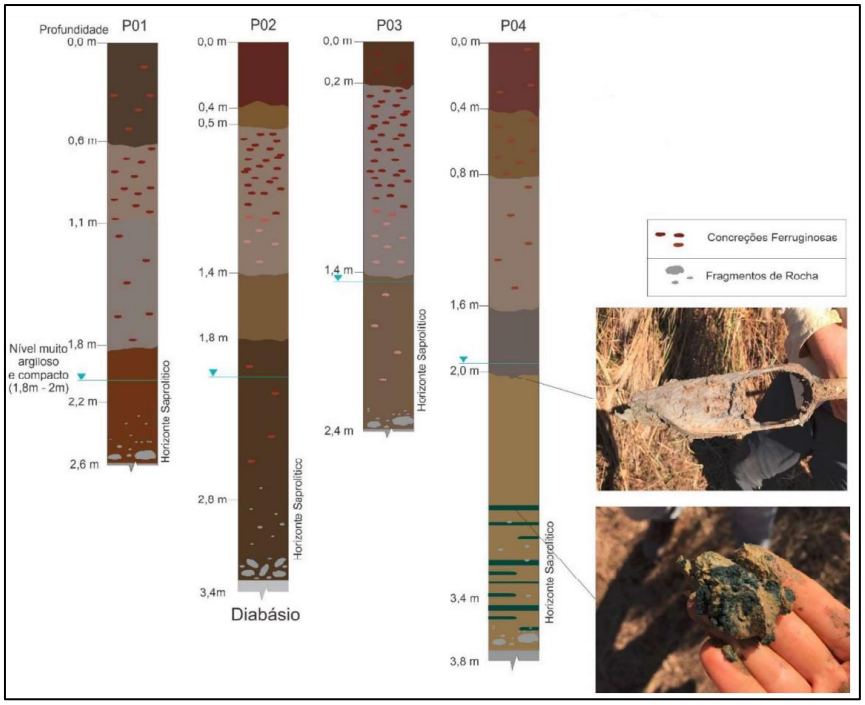
A descrição decorrente da amostragem de solo na área úmida de estudo foi realizada por Casagrande (2023) para o projeto FAPESP Processo 2017/14168-1 (em fase de elaboração) e os resultados são mostrados a seguir e esquematizados na figura 1:

O perfil **P01** apresenta 4 conjuntos de horizontes: (1) horizontes superficiais argilosos de cor escura (2) horizontes bruno acinzentados com concreções ferruginosas (3) horizontes cinza com concreções ferruginosas e (4) horizonte saprolítico.

O Perfil **P02** apresenta 4 conjuntos de horizontes: (1) horizontes superficiais argilosos de cor escura (2) horizontes de coloração bruno oliva granular (3) horizontes bruno acinzentados com concreções ferruginosas e (4) horizontes cinza escuro (2,5Y 4/1) a bruno oliva escuro saprolítico.

O Perfil **P03** apresenta 3 conjuntos de horizontes: (1) horizonte superficial argiloso de cor escura com pequenas concreções ferruginosas (2) horizontes cinza com concreções ferruginosas (3) horizontes marrom acinzentados escuro a cinza com estrutura saprolítica muito alterada.

Figura 1 - Perfil esquemático dos perfis de solo analisados.



Fonte: Casagrande (2023), em fase de elaboração.