

RODRIGO SOARES DA COSTA

INVESTIGAÇÃO DA SEGURANÇA HÍDRICA E DA DINÂMICA DE
EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM ALUVIAL IRRIGADO NO SEMIÁRIDO

Recife - Pernambuco

2024

RODRIGO SOARES DA COSTA

INVESTIGAÇÃO DA SEGURANÇA HÍDRICA E DA DINÂMICA DE
EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM ALUVIAL IRRIGADO NO SEMIÁRIDO

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Agrícola da Universidade
Federal Rural de Pernambuco –
UFRPE, como parte dos requisitos
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Agrícola.

Orientador: Prof. Dr. Abelardo
Antônio de Assunção Montenegro

Coorientador: Prof. Dr. José Roberto
Lopes da Silva

Recife - Pernambuco

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Bibliotecário(a): Suely Manzi – CRB-4 809

C838i

Costa, Rodrigo Soares da.

Investigação da segurança hídrica e da dinâmica de evapotranspiração em aluvial irrigado no semiárido / Rodrigo Soares da Costa. – Recife, 2024.

103 f.; il.

Orientador(a): Abelardo Antônio de Assunção Montenegro.

Co-orientador(a): José Roberto Lopes da Silva.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Recife, BR-PE, 2024.

Inclui referências e apêndice(s).

1. Hidrogeologia. 2. Monitoramento . 3. Arduino (Controlador programável). 4. Evapotranspiração 5. Análise espacial (Estatística).

I. Montenegro, Abelardo Antônio de Assunção, orient. II. Silva, José Roberto Lopes da, coorient.

III. Título

CDD 630

RODRIGO SOARES DA COSTA

TÍTULO: INVESTIGAÇÃO DA SEGURANÇA HÍDRICA E DA DINÂMICA DE
EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM ALUVIAL IRRIGADO NO SEMIÁRIDO

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.

DEFENDIDA em 22/07/2024.

Orientador:

Prof. Dr. Abelardo Antônio de Assunção Montenegro
DEAGRI - UFRPE

Examinadores:

Prof. Dr. José Amilton Santos Júnior
DEAGRI - UFRPE

Prof. Dr. Anderson Luiz Ribeiro de Paiva
DECIV – UFPE

Prof. Dr. Romero Barbosa de Assis Filho
IFPE

Você não percebeu que você é o único representante do seu sonho na face da Terra? Se isso não fizer você correr, chapa. Eu não sei o que vai.

Emicida

*Dedico este trabalho a minha mãe
Raimunda Soares da Costa.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me conceder força, discernimento e resiliência durante esta jornada acadêmica.

A minha mãe Raimunda Soares da Costa e ao meu padrasto Francisco Sabino Sobrinho, que sempre acreditaram em mim, oferecendo apoio para que eu pudesse ter uma educação de qualidade, que infelizmente, eles não puderam ter.

Ao Professor Dr. Abelardo Montenegro, meu orientador, que acreditou e apoiou na entrada dessa jornada, abrindo as portas para um caminho de transformação pessoal e profissional.

Ao Professor Dr. José Roberto, meu coorientador, que não apenas incentivou, mas se disponibilizou a ajudar em momentos de dificuldade, oferecendo suporte fundamental para a conclusão desta pesquisa.

Ao professor Dr. Ênio Farias, que gentilmente forneceu dados da estação climatológica da universidade, contribuindo de forma essencial para o desenvolvimento de parte desta dissertação.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), que me acolheu e proporcionou estrutura e ambiente acadêmico de excelência para desenvolver esta pesquisa.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Pernambuco – FACEPE, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Nível Superior – CAPES, Companhia Pernambucana de Saneamento – COMPESA e a TPF Engenharia, integrantes do programa Reúso de águas residuárias do setor agrícola no semiárido brasileiro - MAI DAI - CNPq.

Aos meus amigos Aline Chagas, Agnes Fonseca, Giselle Almeida, Lizandro Barros, Lua Pereira, Martina Freire, Tamiris Silva e Thayná Almeida, que me ajudaram ou fizeram parte dessa jornada.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para esta conquista.

Costa, R. S. **Investigação da segurança hídrica e da dinâmica de evapotranspiração em aluvial irrigado no semiárido**. 2024. 103f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil.

Resumo geral

A escassez hídrica no semiárido, agravada pelas mudanças climáticas, desafia a agricultura regional. Este estudo objetiva avaliar o impacto das variações climáticas e da irrigação na dinâmica de recarga e rebaixamento do lençol freático, bem como na qualidade da água, visando a segurança hídrica no semiárido pernambucano. Foram desenvolvidas duas atividades principais: a primeira focada no monitoramento hidrogeológico e a segunda na estimativa da evapotranspiração. Na primeira atividade, realizou-se o monitoramento mensal do nível da água, condutividade elétrica e pH em aproximadamente 40 pontos no Vale do Mimoso, Pesqueira-PE, entre setembro de 2022 e abril de 2024. Utilizou-se análise geoestatística e elaboração de mapas de krigagem para representar a variabilidade espaço-temporal dos parâmetros. Na segunda atividade, desenvolveu-se um protótipo Arduino de baixo custo para monitoramento meteorológico, comparando seu desempenho com uma estação Campbell Scientific. Adaptou-se o método de Romanenko para estimar a evapotranspiração na região, oferecendo uma alternativa simplificada e acessível. Os resultados revelaram uma relação inversa entre o Cumulative Rainfall Departure (CRD) e o nível potenciométrico, influenciada pela variabilidade pluviométrica e eventos climáticos extremos. A distribuição da condutividade elétrica mostrou maiores concentrações no centro do vale, com variações sazonais. O pH manteve-se na faixa ideal para agricultura. O monitoramento contínuo destacou a influência da extração de água para irrigação no rebaixamento do aquífero, enfatizando a necessidade de gestão sustentável dos recursos hídricos para garantir a segurança hídrica na região.

Palavras-chave: Monitoramento Hidrogeológico, Geoestatística, Arduino, Evapotranspiração.

Abstract

Water scarcity, intensified by climate change, represents a significant challenge for agriculture in the semi-arid region. This study focuses on the analysis of water dynamics and the management of water resources, emphasizing the importance of monitoring groundwater quality, particularly salinity and pH, and the influence of evapotranspiration with a focus on supporting data for water security. The study revealed that the water table is strongly influenced by factors such as precipitation and water extraction, which causes variations in salinity and requires careful management of this resource. Furthermore, a low-cost monitoring alternative based on Arduino was developed for meteorological monitoring, whose data were compared with those from a Campbell Scientific reference station, and Romanenko's method was adapted to estimate evapotranspiration in the region, offering an alternative and simplified tool. The results emphasize the need for continuous monitoring and sustainable management of water resources, essential for water security and the sustainability of agriculture in Vale do Mimoso. An inverse relationship was observed between the Cumulative Rainfall Departure (CRD) and the potentiometric level, influenced by precipitation variability and extreme weather events. The spatial and temporal variation of the potentiometric level indicated spatial dependence and significant variations throughout the year. The spatial and temporal distribution of electrical conductivity (EC) showed areas of higher EC in the center of the valley, with seasonal variations reflecting the influence of precipitation and water extraction for irrigation. The pH analysis remained in the ideal range for agriculture, despite occasional variations. Monitoring the water level in the Pz p4 well highlighted the influence of water extraction for irrigation on the drawdown of the aquifer, underlining the importance of sustainable management of water resources. The study highlights the effectiveness of low-cost technologies for environmental monitoring, although it recognizes the need for adjustments and additional testing to ensure data accuracy.

Keywords: Water Security, Water Quality Monitoring, Low-Cost Technology

Sumário

CAPÍTULO I	14
1 Introdução	14
2 Objetivos	15
2.1 Geral	15
2.2 Específicos	15
3 Fundamentação teórica.....	15
3.1 Segurança hídrica no semiárido pernambucano.....	15
3.2 Importância da água subterrânea para o semiárido	16
3.3 Qualidade da água subterrânea para fins de irrigação	17
3.4 Efeito das mudanças climáticas na disponibilidade hídrica na região semiárida	19
3.5 Análise da qualidade na medição de instrumentação alternativa	21
Referências	23
CAPÍTULO II - Segurança hídrica em vale aluvial do semiárido	28
Resumo	28
1 Introdução	29
2 Material e métodos	32
2.1 Localização e caracterização da área de estudo	32
2.2 Monitoramento do vale aluvial	34
2.3 Estimativa de bombeamento para irrigação	36
2.4 Análise estatística e geoestatística do monitoramento	38
3 Resultados e discussão	41
3.1 Variabilidade do CRD e Precipitação no vale aluvial.....	41
3.2 Variação espacial e temporal do nível potenciométrico	45
3.3 Distribuição espacial e temporal da condutividade elétrica (CE)	51
3.4 Análise do pH no vale aluvial de maio a dezembro de 2023.....	59
3.5 Avaliação da recarga e rebaixamento do aquífero no poço monitorado	62
4 Conclusões	64
Referências	65

CAPÍTULO III - Estimativa de evapotranspiração utilizando sensores de baixo custo.....	72
Resumo	72
1 Introdução	73
2 Material e métodos	74
2.1 Descrição dos sistemas de monitoramento.....	74
2.1 Elaboração e configuração do Protótipo	75
2.2 Local de instalação e coleta de dados.....	77
2.3 Análise dos dados coletados	79
2.4 Métodos de estimativa da evapotranspiração	81
3 Resultados e discussão	83
3.1 Análise entre o protótipo Arduino (DHT22) e a estação da <i>Campbell Scientific</i> (CS).....	83
3.2 Métodos para estimativa da evapotranspiração de referência	89
3.3 Análises e melhorias futuras.....	95
4 Conclusões.....	96
Referências	97
CAPÍTULO IV.....	102
CONCLUSÃO GERAL	102

Lista de Figuras

CAPÍTULO II

Figura 1 - Vale do Mimoso durante cheia ocorrida em março de 2020.	31
Figura 2 - Mapa de localização do vale aluvial do Riacho Mimoso, bacia do Alto Ipanema, município de Pesqueira-PE.....	33
Figura 3 - Gráfico da variação do CRD, nível médio do lençol freático e balanço hídrico de 2000 a 2023.	41
Figura 4 - Análise do CRD e ocorrência de El Niño e La Niña.	43
Figura 5 - Série temporal para o nível potenciométrico no Vale do Mimoso, média mensal dos anos 2000 a 2019 e média mensal do ano de 2023.	46
Figura 6 - Box-Plots da série potenciométrica do Vale do Mimoso para o ano de 2019 e para o ano de 2023.	47
Figura 7 - Semivariogramas experimentais e modelos teóricos ajustados para a cota potenciométrica por quadrimestre para o ano de 2019.	48
Figura 8 - Semivariogramas experimentais e modelos teóricos ajustados para a cota potenciométrica por quadrimestre para o ano de 2023.	49
Figura 9 - Mapas de cota potenciométrica (m) por quadrimestre para o ano de 2019.	50
Figura 10 - Mapas de cota potenciométrica (m) por quadrimestre para o ano de 2023.	50
Figura 11 - Box-plots da condutividade elétrica para o período do ano 2000 a 2019 e para o ano de 2023 no Vale aluvial do Mimoso, Pesqueira-PE.	53
Figura 12 - Semivariogramas experimentais e modelos teóricos ajustados para dados quadrimestrais de salinidade (CE) para o ano de 2019.	54
Figura 13 - Semivariogramas experimentais e modelos teóricos ajustados para dados quadrimestrais de salinidade (CE) para o ano de 2023.	55
Figura 14 - Mapas de krigagem da CE (dS/m) para os quadrimestres do ano de 2019.	56
Figura 15 - Mapas de krigagem da CE (dS/m) para os quadrimestres do ano de 2023.	56
Figura 16 - Condutividade Elétrica média anual do Vale do Mimoso.	57

Figura 17 - Flutuações de nível potenciométrico e condutividade elétrica, de janeiro de 2000 a dezembro de 2019.	58
Figura 18 - Gráfico da média histórica (2000-2019) do nível (Pz 4.8) e condutividade elétrica (CA 3) para os pontos estáveis em comparação com o ano de 2023.	59
Figura 19 - Box-plots do pH para os pontos analisados para o período de maio a dezembro de 2023.	60
Figura 20 - Gráficos de linha temporal do pH para os pontos monitorados.....	61
Figura 21 - Variação da cota potenciométrica, precipitação e extração de água para irrigação, no poço sentinela P4.	62

CAPÍTULO III

Figura 1 - Protótipo do Arduino desenvolvido para a medição de temperatura do ar e umidade relativa do ar.	75
Figura 2 - Área experimental da UFRPE onde foi instalado e testado o protótipo Arduino e a estação da Campbell Scientific.	78
Figura 3 - Estação da Campbell Scientific localizada no Vale do Mimoso.	82
Figura 4 - Dados de medição do Protótipo Arduino x Estação <i>Campbell Scientific</i> na campanha 1.	84
Figura 5 - Dados de medição do Protótipo Arduino x Estação <i>Campbell Scientific</i> na campanha 2.	85
Figura 6 - Dados de medição do Protótipo Arduino x Estação <i>Campbell Scientific</i> na campanha 3.	86
Figura 7 - Comparação dos resultados de Et0 entre Romanenko x Penman-Monteith e Hargreaves-Samani x Penman-Monteith, respectivamente.	91
Figura 8 - Análise de Bland-Altman e comparação temporal entre Romanenko x Penman-Monteith.	92
Figura 9 - Análise de Bland-Altman e comparação temporal entre Hargreaves-Samani x Penman-Monteith.	93

Lista de tabelas

CAPÍTULO II

Tabela 1 - Coeficiente das culturas cultivadas no Vale Aluvial.	38
Tabela 2 - Média histórica mensal da precipitação e evapotranspiração.	42
Tabela 3 - Análise de precipitação em períodos de ocorrência do El Niño.	44
Tabela 4 - Estatística descritiva para a condutividade elétrica (CE) no ano de 2023.	52

CAPÍTULO III

Tabela 1 - Itens utilizados para montagem do protótipo e preço avaliado em abril de 2024.	77
Tabela 2 - Resumo das análises elaboradas para as 3 campanhas de UR e temperatura.	87
Tabela 3 - Resumo das análises elaboradas para a comparação dos métodos de Romanenko e Hargreaves-Smanai.	93

1 Introdução

A gestão dos recursos hídricos no semiárido pernambucano enfrenta desafios significativos devido à variabilidade climática e à crescente demanda por água. Este estudo foca na análise da dinâmica do lençol freático e da qualidade da água no Vale do Mimoso, Pesqueira-PE, visando aprimorar a segurança hídrica local.

O objetivo principal é investigar como as variações climáticas e práticas de irrigação afetam a recarga e o rebaixamento do lençol freático, além de avaliar a qualidade da água utilizada na agricultura. Para isso, foram desenvolvidas duas atividades: a primeira envolve o monitoramento hidrogeológico detalhado, enquanto a segunda busca estimar a evapotranspiração através de métodos acessíveis ao produtor local.

Na primeira atividade, o foco está no levantamento de dados hidrogeológicos, utilizando técnicas de geoestatística para mapear a variabilidade espacial e temporal dos níveis de água, condutividade elétrica, além de avaliar o pH. Este monitoramento fornece ideias cruciais sobre a interação entre precipitação e níveis aquíferos, além de identificar áreas de risco de salinização.

A segunda atividade introduz um protótipo de baixo custo baseado em Arduino para coletar dados meteorológicos, comparando sua eficácia com equipamentos padrão. Este sistema visa facilitar o monitoramento contínuo e acessível da evapotranspiração, um indicador crítico para a gestão hídrica eficiente.

Os resultados esperados deste estudo contribuirão para estratégias de manejo sustentável dos recursos hídricos, oferecendo soluções práticas para melhorar a resiliência hídrica em regiões semiáridas. A abordagem integrada proposta tem potencial para ser replicada em outras áreas com desafios semelhantes, promovendo a sustentabilidade e a segurança hídrica.

2 Objetivos

2.1 Geral

Avaliar a sustentabilidade da irrigação no semiárido pernambucano e compreender como a variação da precipitação afeta a recarga do lençol freático, buscando fornecer subsídios para o manejo eficiente dos recursos hídricos, garantindo a segurança hídrica e promovendo práticas agrícolas sustentáveis na região.

2.2 Específicos

- Analisar a variação da precipitação e sua influência na recarga do aquífero utilizando registros experimentais meteorológicos e de monitoramento do lençol freático;
- Investigar o impacto das práticas de irrigação na sustentabilidade do uso da água subterrânea para agricultura na região semiárida, considerando a série temporal de nível dinâmico em poço sentinela;
- Avaliar as variações na quantidade e qualidade da água subterrânea, especialmente em termos de salinidade e pH, mapeando a distribuição espacial;
- Identificar períodos de escassez e excesso hídrico e suas potenciais implicações para a gestão dos recursos hídricos na bacia do riacho Mimoso;
- Avaliar os rebaixamentos de níveis associados à evapotranspiração;
- Investigar metodologias simplificadas para estimativa da evapotranspiração;
- Desenvolver e implementar instrumentação de baixo custo para estimativa da evapotranspiração.

3 Fundamentação teórica

3.1 Segurança hídrica no semiárido pernambucano

O semiárido brasileiro está localizado na zona tropical, entre as latitudes 0° e 20° S, e representa aproximadamente 13% do território brasileiro. Ele compreende estados da região Nordeste e parte do norte de Minas Gerais. No total, 1.262 municípios estão incluídos na zona semiárida. Todos os municípios incluídos na zona semiárida seguiram critérios climáticos específicos, como

precipitação média anual de até 800 mm, índice de aridez igual ou menor que 0,5 ou porcentagem diária de déficit hídrico igual ou maior que 60% ao longo do ano Silva (2023).

O semiárido do Nordeste brasileiro é caracterizado por baixa disponibilidade hídrica, precipitações irregulares e elevadas taxas de evapotranspiração, o que torna o gerenciamento dos recursos hídricos um constante desafio (Almeida et al., 2024). O município de Pesqueira, situado no semiárido de Pernambuco, possui um vale aluvial de elevada disponibilidade hídrica para as atividades agrícolas e o abastecimento de água local (Albuquerque et al., 2015). O monitoramento de vales aluviais no semiárido pernambucano é essencial para a gestão dos recursos hídricos e a segurança hídrica da região.

A segurança hídrica no semiárido de Pernambuco é um componente essencial para a sustentabilidade regional, garantindo a disponibilidade contínua de água em quantidade e qualidade adequadas para atender às necessidades de saúde, subsistência e produção agrícola (Soares et al., 2023). Embora a qualidade da água subterrânea seja geralmente adequada para irrigação, a superexploração e os problemas de salinidade representam desafios significativos para a sustentabilidade.

3.2 Importância da água subterrânea para o semiárido

A água subterrânea desempenha um papel crucial no abastecimento de regiões semiáridas em todo o mundo, sendo muitas vezes a única fonte de água disponível durante os períodos de seca prolongada (Nguyen *et al.*, 2022).

No Estado de Pernambuco, o semiárido apresenta uma precipitação média anual variando entre 400 e 800 mm, com alta variabilidade espacial e temporal, resultando em frequentes períodos de escassez hídrica (Montenegro; Montenegro, 2012). Nesse contexto, a água subterrânea torna-se estratégica para o abastecimento público, a agricultura e a pecuária, impactando a segurança hídrica e alimentar (Hirata *et al.*, 2015).

O município de Pesqueira, localizado no semiárido pernambucano, possui uma população de aproximadamente 67 mil habitantes (IBGE, 2020) e enfrenta desafios relacionados à disponibilidade hídrica. Na região está situado o Aquífero do Alto Ipanema, cuja exploração sustentável é fundamental para o

desenvolvimento socioeconômico do município, garantindo o acesso à água para consumo humano, dessedentação animal e irrigação de culturas adaptadas à região (Peixoto *et al.*, 2024).

A exploração das águas subterrâneas no semiárido tem sido uma alternativa importante para o abastecimento da região. No entanto, esse recurso vem enfrentando degradação nas últimas décadas, como a redução da qualidade e quantidade devido a fatores antrópicos, como a superexploração e a poluição, e a fatores naturais, como o clima e o aquecimento global (Cavalcante Júnior *et al.*, 2019). Para uma gestão sustentável desse recurso, é essencial que haja um equilíbrio entre a taxa de recarga e a taxa de extração, evitando assim a exaustão das reservas permanentes do aquífero quando a retirada não é devidamente monitorada e gerenciada (Albuquerque *et al.*, 2015).

A superexploração dos aquíferos pode resultar em um rebaixamento significativo do nível piezométrico, aumentando os custos de bombeamento e comprometendo a viabilidade econômica da atividade agrícola (Leon *et al.*, 2024).

A segurança hídrica no semiárido depende de uma gestão integrada e sustentável dos recursos hídricos, considerando tanto as águas superficiais quanto as subterrâneas (Silveira *et al.*, 2021). A implementação de políticas públicas que promovam o uso racional da água, o monitoramento contínuo dos aquíferos, o controle da poluição e o incentivo a práticas de recarga artificial podem contribuir para a manutenção da disponibilidade e qualidade das águas subterrâneas a longo prazo (Pinheiro *et al.*, 2023). Além disso, a educação ambiental e a participação da sociedade são fundamentais para a conscientização sobre a importância da conservação desse recurso estratégico (Hanke *et al.*, 2017).

3.3 Qualidade da água subterrânea para fins de irrigação

A qualidade da água subterrânea é um fator crucial para o sucesso da agricultura, especialmente em regiões semiáridas, onde esse recurso é frequentemente a principal fonte de água para irrigação. No semiárido brasileiro, a qualidade das águas subterrâneas pode variar significativamente devido a fatores como a geologia local, o clima e as atividades antrópicas (Silva *et al.*,

2022). Dentre as variáveis que influenciam a adequação da água para fins agrícolas, destacam-se a salinidade e o pH.

A salinidade elevada da água subterrânea é um dos principais desafios para a agricultura no semiárido, uma vez que o excesso de sais pode afetar negativamente o crescimento e a produtividade das culturas (Carvalho *et al.*, 2020). A dinâmica hidrossalina das águas subterrâneas é influenciada por diversos fatores, como a recarga do aquífero, a evapotranspiração, a interação com águas superficiais e a dissolução de minerais do solo (Montenegro *et al.*, 2010). O entendimento dessa dinâmica, em particular nas diferentes estações do ano, é fundamental para a gestão sustentável dos recursos hídricos subterrâneos e para a seleção de culturas adaptadas às condições locais.

O pH da água subterrânea também é uma importante variável para a agricultura, pois pode afetar a disponibilidade de nutrientes para as plantas e a atividade microbiana do solo (Kumar *et al.*, 2021). No semiárido brasileiro, o pH das águas subterrâneas pode variar de ácido a alcalino, dependendo das características geológicas e dos processos hidrogeoquímicos do aquífero (Stefano *et al.*, 2019). Águas com pH muito ácido ou muito alcalino podem causar desequilíbrios nutricionais nas plantas e prejudicar o seu desenvolvimento.

A compreensão da dinâmica hidrossalina e do pH das águas subterrâneas é essencial para a seleção de culturas adequadas às condições locais do semiárido. Culturas com diferentes tolerâncias à salinidade e a variações de pH podem ser escolhidas com base nas características específicas da água subterrânea disponível para irrigação (Guimarães *et al.*, 2023). Além disso, práticas de manejo da irrigação e do solo podem ser adaptadas para mitigar os efeitos negativos da salinidade e do pH inadequado, contribuindo para o desenvolvimento de uma agricultura sustentável e resiliente na região.

Para garantir o uso sustentável das águas subterrâneas na agricultura do semiárido, é fundamental o monitoramento contínuo da qualidade da água e a integração entre o conhecimento científico e as práticas agrícolas. A participação dos agricultores e a disseminação de informações sobre as melhores práticas de manejo são essenciais para a conservação dos recursos hídricos e para a promoção de uma agricultura adaptada às condições locais (Lima *et al.*, 2016).

3.4 Efeito das mudanças climáticas na disponibilidade hídrica na região semiárida

As mudanças climáticas têm impactos significativos na disponibilidade hídrica da região semiárida, afetando tanto a ocorrência de eventos extremos de chuva e estiagem quanto a temperatura, o que impacta as taxas de evapotranspiração e os níveis potenciométricos dos aquíferos.

Disponibilidade hídrica refere-se à quantidade de água acessível para atender às demandas humanas, agrícolas e ambientais, considerando tanto a quantidade quanto a qualidade da água disponível em uma região (Freitas; Araújo, 2021). Essas alterações no ciclo hidrológico podem ter consequências severas para a agricultura, o abastecimento de água e a sustentabilidade dos ecossistemas na região (Marengo et al., 2018).

Os eventos extremos de chuva, caracterizados por precipitações intensas e concentradas em curtos períodos, têm se tornado mais frequentes, inclusive no semiárido devido às mudanças climáticas (Alvalá et al., 2019). Esses eventos podem causar enchentes, erosão do solo e danos à infraestrutura, além de dificultar a infiltração da água no solo (quando a intensidade da precipitação é superior à taxa de infiltração) e, assim, a recarga dos aquíferos. Por outro lado, períodos prolongados de seca, também associados às mudanças climáticas, podem reduzir drasticamente a disponibilidade de água superficial e subterrânea, prejudicando a agricultura e o abastecimento humano (Gondim, 2017). Nestes períodos de estiagem, frequentemente as aduções de água aumentam, em particular os bombeamentos para a agricultura irrigada.

A evapotranspiração é outro processo influenciado pelas mudanças climáticas e que afeta diretamente a disponibilidade hídrica no semiárido. O aumento da temperatura e a alteração dos padrões de vento e umidade relativa do ar podem intensificar a evapotranspiração, levando a uma maior perda de água do solo e das plantas para a atmosfera (Silva et al., 2009). No caso dos vales aluviais irrigados, o aumento da evapotranspiração está associado ao incremento dos bombeamentos, agravando a disponibilidade de água. Esse processo pode levar ao rebaixamento do nível potenciométrico dos aquíferos, reduzindo a disponibilidade de água subterrânea e tornando mais difícil e onerosa a captação de água para irrigação e abastecimento (Montenegro; Montenegro, 2012).

Para mitigar os efeitos das mudanças climáticas na disponibilidade hídrica do semiárido, é necessário adotar medidas de adaptação e gestão sustentável dos recursos hídricos. Isso inclui o uso de técnicas de conservação do solo e da água, como o uso de cobertura morta e a adoção de sistemas de irrigação eficientes (Santos *et al.*, 2021). Além disso, o monitoramento contínuo das variáveis hidrológicas, como precipitação, evapotranspiração e nível dos aquíferos, é fundamental para a tomada de decisões informadas e a implementação de políticas públicas adequadas que garantam a segurança hídrica para as gerações atuais e futuras (Rodrigues Júnior *et al.*, 2023).

A aplicação de cobertura morta (mulching) na superfície do solo é uma técnica conservacionista que pode contribuir significativamente para a redução do consumo de água na irrigação em regiões semiáridas. Essa prática consiste em cobrir o solo com materiais orgânicos, como palha, folhas secas, cascas de árvores ou resíduos de culturas, formando uma camada protetora que diminui a evaporação da água do solo, mantém a temperatura mais estável e reduz o impacto das gotas de chuva, evitando a compactação e a erosão (Lambert *et al.*, 2017). Além disso, a cobertura morta favorece a infiltração da água no solo, aumentando a capacidade de armazenamento e reduzindo o escoamento superficial (Yang *et al.*, 2022). Ao minimizar as perdas de água por evaporação e melhorar a eficiência do uso da água pelas plantas, a aplicação de cobertura morta pode levar a uma diminuição da necessidade de irrigação, reduzindo os bombeamentos, e assim contribuindo para a conservação dos recursos hídricos e para a sustentabilidade da agricultura no semiárido (Pereira *et al.*, 2015).

A conscientização e o engajamento da população local também são essenciais para o enfrentamento dos desafios impostos pelas mudanças climáticas na região semiárida. A promoção de práticas de uso racional da água, a capacitação dos agricultores em técnicas de manejo adaptadas às condições locais e o fortalecimento das instituições responsáveis pela gestão dos recursos hídricos são medidas que podem contribuir para a construção de uma maior resiliência diante das incertezas climáticas (Gutiérrez *et al.*, 2014). A implementação de práticas eficientes de manejo da irrigação requer estimativas precisas das demandas hídricas das culturas, as quais estão diretamente relacionadas à evapotranspiração potencial. Assim, uma estimativa adequada da evapotranspiração, realizada em nível de lote agrícola, pode contribuir

significativamente para o aumento da segurança hídrica na região. No entanto, o acesso a informações precisas sobre evapotranspiração é frequentemente limitado devido ao alto custo dos equipamentos de medição e à baixa cobertura espacial das medidas realizadas pelas Redes de Monitoramento oficiais no semiárido de Pernambuco.

3.5 Análise da qualidade na medição de instrumentação alternativa

A análise da qualidade na medição de instrumentação alternativa é fundamental para garantir a confiabilidade e a precisão dos dados obtidos. Quando se trata da validação de novos instrumentos de medição, é essencial utilizar métodos estatísticos adequados para avaliar a concordância entre o instrumento proposto e um método de referência já estabelecido. Dentre os principais parâmetros utilizados para essa finalidade, destacam-se o coeficiente de correlação de Pearson (r), o coeficiente de determinação (R^2), a raiz do erro quadrático médio (RMSE) e a análise de Bland-Altman (Giavarina, 2015).

O coeficiente de correlação de Pearson (r) mede a força e a direção da relação linear entre duas variáveis contínuas. Seu valor varia de -1 a +1, sendo que valores próximos a +1 indicam uma forte correlação positiva, valores próximos a -1 indicam uma forte correlação negativa e valores próximos a zero indicam uma fraca correlação entre as variáveis (Araujo, 2016). Já o coeficiente de determinação (R^2) é uma medida da proporção da variabilidade em uma variável que é explicada pela variabilidade da outra. O R^2 varia de 0 a 1, sendo que valores mais próximos de 1 indicam um melhor ajuste do modelo linear aos dados (Schober; Vetter, 2020).

A raiz do erro quadrático médio (RMSE) é uma medida da diferença média entre os valores previstos por um modelo e os valores observados. Quanto menor o valor do RMSE, melhor é o desempenho do modelo (Chai; Draxler, 2014). No contexto da validação de instrumentos de medição, o RMSE pode ser utilizado para avaliar a magnitude das diferenças entre as medições do instrumento proposto e do método de referência.

Por fim, a análise de Bland-Altman é um método gráfico utilizado para avaliar a concordância entre duas técnicas de medição. Nesse método, a diferença entre as medições dos dois instrumentos é plotada contra a média dessas medições. A partir desse gráfico, é possível calcular o viés (diferença

média) e os limites de concordância (média $\pm$ 1,96 desvios-padrão das diferenças), que indicam a faixa na qual se espera que 95% das diferenças entre as medições estejam contidas (Bland; Altman, 1999). A análise de Bland-Altman permite identificar possíveis tendências ou discrepâncias sistemáticas entre os instrumentos de medição.

A utilização desses parâmetros estatísticos na comparação de novos instrumentos de medição com métodos de referência é essencial para garantir a validação adequada desses instrumentos. Uma alta correlação (r e R^2), baixo RMSE e boa concordância na análise de Bland-Altman indicam que o instrumento proposto é capaz de fornecer medições confiáveis e precisas, semelhantes às obtidas pelo método de referência. Essa validação é fundamental para assegurar a qualidade dos dados coletados e a aplicabilidade do novo instrumento em estudos e aplicações práticas.

Referências

ALBUQUERQUE, C. G.; FONTES JÚNIOR, R. V. P.; MONTENEGRO, A. A. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Recarga de aquífero aluvial sob uso agrícola. **Águas Subterrâneas**, v. 29, n. 1, p. 60-71, 2015.

ALMEIDA, T. A. B.; CARVALHO, A. A.; COELHO, V. H. R.; DA SILVA, T. G. F.; DE CARVALHO, A. A.; MACKAY, R.; MONTENEGRO, A. A. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Hydrogeological trends in an alluvial valley in the Brazilian semiarid: Impacts of observed climate variables change and exploitation on groundwater availability and salinity. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 53, p. 101784, 2024.

ALVALÁ, R. C. S.; BRITO, S. S. B.; CARVALHO, M. A.; CUNHA, A. P. M. A.; MARENGO, J. A.; MORAES, O. L. L.; SELUCHI, M. E. Drought monitoring in the Brazilian Semiarid region. **Anais da Academia Brasileira de Ciencias**, v. 91, suppl. 1, e20170209, 2019.

BLAND, J. M.; ALTMAN, D. G. Measuring agreement in method comparison studies. *Statistical Methods*. **Medical Research**, v. 8, n. 2, p. 135-160, 1999.

CARVALHO, L. L.; ANDRADE, E. M.; CARVALHO, C. M.; GOMES FILHO, R. R.; LACERDA, C. F.; LOPES, F. B. Variabilidade espaço-temporal da qualidade das águas subterrâneas em área irrigada no semiárido brasileiro. **Research, Society and Development**, 2020.

CAVALCANTE JÚNIOR, R. G.; AZEVEDO FILHO, F. R.; DA SILVA, N. F.; VASCONCELOS FREITAS, M. A. Sustainable Groundwater Exploitation Aiming at the Reduction of Water Vulnerability in the Brazilian Semi-Arid Region. **Energies**, v. 12, n. 5, p. 904, 2019.

CHAI, T.; DRAXLER, R. R. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? - Arguments against avoiding RMSE in the literature. **Geoscientific Model Development**, v. 7, n. 3, p. 1247-1250, 2014.

DOS SANTOS, P. R.; ALEXANDRE, F. D.; CARVALHO, A. A.; EL-DEIR, S. G.; GARCIA, A. C.; LEAL, A. K.; LIMA, B. L.; RAMOS, R. P.; SANTANA, V. V.; SILVA, H. P. Gestão de água na irrigação e modificações na cobertura do solo em reservatório artificial no semiárido brasileiro. **Guaju: Revista Brasileira de Desenvolvimento Territorial Sustentável**, [S. l.], v. 7, n. 1, p. 180–212, 2021.

FREITAS, P. A. B.; ARAÚJO, S. M. S. Análise da produção científica internacional sobre segurança hídrica utilizando a base de dados Web of Science (2010-2021). **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v. 12, n. 5, p. 606-618, 2021.

GIAVARINA, D. Understanding Bland Altman analysis. **Biochemia Médica**, v. 25, n. 2, p. 141-151, 2015.

GONDIM, J. E.; ALVES, R. F.; FIOREZE, A. P.; SOUZA, W. G. A seca atual no Semiárido nordestino – Impactos sobre os recursos hídricos. **Parcerias Estratégicas**, v. 22, n. 44, p. 277-300, 2017.

GUIMARÃES, D. G.; AMARAL, C. L.; GUEDES, M. O.; OLIVEIRA, L. M. Efeito da salinidade na água de irrigação em cultivares de feijão-caupi. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, 2023.

GUTIERREZ APA, ENGLE NL, DE NYS E, MOLEJÓN C AND MARTINS ES. Drought preparedness in Brazil. **Weather and Climate Extremes**, v. 95, n. 3, p. 95-106, 2014.

HANKE, D.; ÁVILA, M. R.; BARRETO, A. S.; BECKER, C.; NASCIMENTO, S. G. Conservação do solo e da água na Região da Campanha, Estado do Rio Grande do Sul: percepção de produtores rurais. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, 2022.

HIRATA, R.; BERNARDINO LUIZ, M.; CONICELLI, B. P.; FERRARI, L.; PINHATTI, A.; PORTO, R. O Sistema Aquífero Guarani e a Crise hídrica nas Regiões de Campinas e São Paulo (SP). **Revista USP**, n. 106, p. 59-70, 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Pesqueira: panorama. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pe/pesqueira/panorama>. Acesso em: 13 abr. 2024.

KUMAR, B.; ABDELMOHSEN, S.A.; ALKALLAS, F.H.; DASS, A.; DHAR, S.; EL-ABEDIN, T.K.; ELANSARY, H.O.; PARAMESH, V.; PAUL, S.; UPADHYAY, P.K. Microbial Biomass Carbon, Activity of Soil Enzymes, Nutrient Availability, Root Growth, and Total Biomass Production in Wheat Cultivars under Variable Irrigation and Nutrient Management. **Agronomy**, v. 11, p. 669, 2021.

LAMBERT, R. A.; BARRO, L. S.; CARMO, K. S.; OLIVEIRA, A. M.; BORGES, A. A. Mulching é uma opção para o aumento de produtividade da melancia. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 4, p. 53-57, 2017.

LIMA, L. C.; OLIVEIRA, E. L.; SANTOS, T. E.; SOUZA, E. R. Práticas de manejo e conservação do solo: Percepção de agricultores da Região Semiárida pernambucana. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 11, p. 148-153, 2016.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; ALVALA, R. C. S.; BRITO, S.; CUNHA, A. P.; MORAES, O. L. L. Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region. **Anais da Academia Brasileira de Ciencias**, v. 90, n. 2 suppl 1, p. 1973–1985, 2018.

MELO LEÓN, S.; BEEK, R. V.; BIERKENS, M. F. P.; REINHARD, S. HELGA: a global hydro-economic model of groundwater-fed irrigation from a farmer's perspective. **Environmental Research Letters**, 2024.

MONTENEGRO, S. G.; MONTENEGRO, A.; RAGAB, R. Improving agricultural water management in the semi-arid region of Brazil: experimental and modelling study. **Irrigation Science**, v. 28, n. 4, p. 301-316, 2010.

NGUYEN, T. T.; NGUYEN, T. H.; PHAM, T. H.; TRAN, T. V.; TRAN, V. T. Groundwater simulation in Dak Lak province based on MODFLOW model and climate change scenarios. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, p. 1-12, 2022.

PEIXOTO, F. S.; ARAÚJO, K. V.; CAVALCANTE, I. N.; SILVEIRA, R. N. M. C. Conservação e proteção da água subterrânea: uma revisão de metodologias de mapeamento de aquíferos para o ordenamento territorial. **Caminhos de Geografia**, v. 21, n. 75, p. 1–14, 2020.

PEREIRA, L. S.; ALLEN, R. G.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. **Agricultural Water Management**, v. 147, p. 4-20, 2015.

PINHEIRO, A. F.; ARAÚJO, K. V.; CAVALCANTE, I. N.; FREIRE, D. F.; OLIVEIRA, R. M. Qualidade da água e aspectos construtivos dos poços do aquífero aluvionar do rio Jaguaribe, município de São João do Jaguaribe, Ceará. **Derbyana**, 44, 2023.

RODRIGUES JÚNIOR, J. C.; MONTENEGRO, S. M.; OLIVEIRA, L. M.; PAIVA, A. L.; SANTANA, A. C.; TAVARES, D. M. Análise estatística multivariada de variáveis hidrológicas na bacia hidrográfica do rio Pajeú - PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 2023.

SCHOBBER, P.; VETTER, T. R. Correlation Analysis in Medical Research. **Anesthesia and Analgesia**, v. 130, n. 2, p. 332, 2020.

SILVA, Í. V.; GALVÍNCIO, J. D.; NÓBREGA, R. S. Impacto das mudanças climáticas nas respostas hidrológicas do rio ipojuca (pe) – parte 2: cenários de aumento de temperatura. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 2, 2009.

SILVA, J. O.; AMARAL, E. M.; AVIZ, R. O.; LEITE, M. L.; LEITE, R. M.; SANTOS, J. P.; SALVADOR, K. R.; SILVA, N. S. O uso da irrigação com água salina pode reduzir o déficit de forragem no Semiárido brasileiro? **Research, Society and Development**, 2022.

SILVA, L. A. P.; FERNANDES FILHO, E. I.; FILGUEIRAS, R.; LEITE, M. E.; SENA-SOUZA, J. P.; SILVA, C. R.; SOUZA, C. M. P. de. Mapping the effects of climate change on reference evapotranspiration in future scenarios in the Brazilian Semiarid Region - South America. **Revista Brasileira De Geografia Física**, v. 16, n. 2, p. 1001–1012, 2023.

SILVEIRA, C. S.; COSTA, A. A.; COUTINHO, M. M.; NORONHA, A. W. T.; SOUZA FILHO, F. A.; VASCONCELOS JÚNIOR, F. C. Diagnóstico descritivo da gestão e do planejamento de recursos hídricos no Semiárido Brasileiro. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 1, p. 110-124, 2020.

STEFANO, P. H.; CRISTO, S. A.; GOMES, I. P.; SANTOS, M. M. Avaliação hidrogeoquímica das águas superficiais e subterrâneas na região sudoeste da bacia do rio Subaúma, Bahia. **Geochimica Brasiliensis**, 2019.

YANG, L.; DUAN, J.; GINO, X.; GOUP, X.; JANG, J.; PENG, L.; ZHANG, X. Effects of Straw Mulching on Near-Surface Hydrological Process and Soil Loss in Slope Farmland of Red Soil. **Water**, v. 14, n. 21, p. 3388, 2022.

Resumo

A gestão sustentável dos recursos hídricos é crucial, especialmente em regiões semiáridas, para a segurança hídrica e a sustentabilidade da agricultura familiar. Entre setembro de 2022 e abril de 2024 foi monitorado o nível da água, a condutividade elétrica (CE) e o pH em aproximadamente 40 pontos no Vale do Mimoso em Pesqueira-PE, visando entender a variabilidade espaço-temporal da água subterrânea e seu impacto na irrigação. A análise incluiu a avaliação do rebaixamento do lençol freático, a influência de eventos climáticos extremos como El Niño e La Niña, e a elaboração de mapas de krigagem para representar a variação espacial e temporal da cota potenciométrica e da condutividade elétrica (CE), bem como a comparação entre o método Cumulative Rainfall Departure (CRD) com o nível médio e os componentes do balanço hídrico. Os resultados indicaram que o pH se manteve entre 6,5 e 8,5, faixa ideal para a absorção de nutrientes pelas plantas. Observou-se um aumento gradual da CE de setembro a dezembro de 2023. Períodos de desvios positivos do CRD indicaram maior proximidade do lençol freático à superfície, enquanto desvios negativos resultaram em um nível potenciométrico mais distante. A ocorrência de El Niño e La Niña evidenciou a complexa relação entre o CRD, a precipitação e os eventos climáticos. Em janeiro de 2023, observou-se níveis potenciométricos elevados, exceto na área central do vale, indicando uma região de maior recarga do aquífero. A partir de julho de 2023, quando iniciou um período com baixa precipitação, houve uma redução no nível potenciométrico, enquanto em dezembro de 2023, ocorreu uma distribuição espacial mais homogênea e maior profundidade até o lençol freático. O monitoramento contínuo do nível potenciométrico, utilizando um sensor da Ampeq, revelou que os eventos de precipitação contribuíram para a recarga do aquífero, enquanto a baixa pluviosidade de setembro a dezembro de 2023, associada à extração de água para irrigação, reduziu o nível d'água.

Palavras-chave: Monitoramento de Água Subterrânea, Estabilidade Temporal, Krigagem.

1 Introdução

A água é um recurso essencial para a vida na Terra, mas sua disponibilidade é limitada. Embora cerca de 71% da superfície do planeta seja coberta por água, apenas uma pequena fração é água doce acessível para consumo humano e uso agrícola (WWAP, 2022). Estima-se que 97,5% da água na Terra seja salgada, enquanto apenas 2,5% seja água doce. A importância da água doce é ainda mais evidenciada pelo fato de que a agricultura irrigada é o setor que mais consome água globalmente, sendo responsável por cerca de 70% das retiradas de água doce (FAO, 2022).

Com o crescimento populacional e as mudanças nos padrões de consumo, a demanda por alimentos e, conseqüentemente, por água para irrigação, tende a aumentar (OECD, 2022). Além disso, as mudanças climáticas estão alterando a distribuição espacial e temporal das chuvas, afetando a disponibilidade de água em muitas regiões (IPCC, 2022). Diante desse cenário, a gestão sustentável dos recursos hídricos e a adoção de práticas agrícolas eficientes no uso da água são fundamentais para garantir a segurança hídrica e alimentar no futuro (UNESCO, 2022).

Neste contexto, o monitoramento das águas subterrâneas se torna uma ferramenta para evitar a superexploração e manter a qualidade da água (Monção; Veloso, 2021), possibilitando obter dados mais precisos e desenvolver estratégias eficazes na gestão hídrica. A análise da salinidade da água é igualmente importante, pois níveis elevados de salinidade podem comprometer a saúde do solo e a produtividade das culturas, afetando diretamente a produção agrícola na região (Castro; Santos *et al.*, 2019), enquanto o monitoramento do pH da água é fundamental para garantir um ambiente propício ao desenvolvimento das plantas (Msimbira; Smith, 2020).

A recarga do lençol freático, influenciada por fatores climáticos e antrópicos, apresenta desafios no gerenciamento de recursos hídricos para a agricultura sustentável devido às chuvas irregulares e aos efeitos de transferência de água entre bacias (Costa *et al.*, 2023). O monitoramento contínuo do nível da água em poços possibilita a análise da dinâmica de recarga, prevendo as respostas dos aquíferos aos bombeamentos e aprimorando as estratégias de gerenciamento de recursos hídricos de forma eficiente (Souza *et al.*, 2021).

A evapotranspiração é um processo que interfere diretamente nos níveis potenciométricos nos vales aluviais irrigados, tanto a partir de fenômenos de ascensão capilar quanto das extrações pelos bombeamentos, para suprir as demandas dos cultivos. A área de estudo em Pesqueira-PE é caracterizada pela presença de agricultores de assentamento, que dependem diretamente dos recursos hídricos locais para o cultivo de uma variedade de produtos agrícolas, incluindo cenoura (*Daucus carota* L.), repolho (*Brassica oleracea* L. var. *capitata* L.), pimentão (*Capsicum annum*), tomate (*Lycopersicon esculentum*), melancia (*Citrullus lanatus*), coentro (*Coriandrum sativum*), maxixe (*Cucumis anguria*) e milho (*Zea mays*) (Almeida, 2020).

A sustentabilidade da agricultura nestas comunidades depende não apenas da disponibilidade de água, mas também da sua qualidade, portanto, o monitoramento contínuo dos parâmetros da água auxilia a agricultura sustentável nas comunidades rurais (Morais *et al.*, 2023).

Este cenário demanda uma compreensão profunda das dinâmicas hídricas para assegurar a sustentabilidade dos recursos naturais e a segurança hídrica da população local. Diante disso, abordar a disponibilidade e a qualidade da água na região, com um enfoque particular no monitoramento do lençol freático, na salinidade e no pH da água torna-se essencial.

A precipitação em Pesqueira-PE, município localizado no Agreste de Pernambuco, apresenta uma variabilidade espaço-temporal significativa, com médias anuais em torno de 600 a 800 mm (Silva *et al.*, 2012; Andrade *et al.*, 2018). A distribuição das chuvas é irregular ao longo do ano, concentrando-se principalmente entre os meses de março a julho (Silva *et al.*, 2022). Essa sazonalidade é influenciada por sistemas atmosféricos como a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCANs) e os Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOLs) (Rao *et al.*, 2016; Park *et al.*, 2021). Além disso, a ocorrência de eventos extremos de precipitação está associada a fenômenos de grande escala, como o El Niño-Oscilação Sul (ENOS) (Medeiros *et al.*, 2016; Alcantara *et al.*, 2020).

A base de dados foi coletada entre os anos de 2000 e 2023, pelo Laboratório de Água e Solo da UFRPE, a partir de várias dissertações e Teses, publicados em documentos como Andrade *et al.* (2012), Albuquerque *et al.* (2015), e Almeida *et al.* (2024), com uma pausa no período mais crítico da

pandemia de COVID-19, sendo interrompido em março de 2020 e retomado em setembro de 2022. A escolha desses intervalos temporais é estratégica, permitindo avaliar o comportamento dos recursos hídricos em um contexto pré-pandêmico e observar as tendências e variações que emergiram após o período em que o monitoramento contínuo foi interrompido devido às restrições impostas pela crise sanitária global. É importante destacar que, durante a pandemia, especificamente março de 2020, ocorreu uma série de eventos pluviométricos que resultaram em enchentes na região, como apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Vale do Mimoso durante cheia ocorrida em março de 2020.



Fonte: Registro do agricultor Josa (2020).

Na Figura 1 observa-se o Vale do Mimoso em março de 2020 após evento extremo de chuva. Esses sistemas respondem de forma significativa a eventos extremos globais, impactando o uso setorial da água. Compreender essas respostas ajuda no desenvolvimento de estratégias eficazes de gestão da água para lidar com a escassez de água durante variações climáticas extremas (Gomes *et al.*, 2018).

A geoestatística é uma área da estatística aplicada que se concentra na análise e modelagem de dados espacialmente distribuídos (Matheron, 1963). Ela combina conceitos de estatística, matemática e ciências da terra para estudar fenômenos que variam no espaço e no tempo, como a distribuição de recursos

naturais, a propagação de poluentes ou a variabilidade de propriedades do solo (Goovaerts, 1997). A importância da geoestatística reside na sua capacidade de quantificar a incerteza associada a estimativas e previsões espaciais, levando em consideração a dependência espacial entre as observações (Webster; Oliver, 2007).

Através de técnicas como a variografia, krigagem e simulação estocástica, a geoestatística permite interpolar valores em locais não amostrados, mapear a distribuição espacial de variáveis de interesse e avaliar a incerteza associada a essas estimativas (Chilès; Delfiner, 2012). Portanto, a geoestatística desempenha um papel crucial na compreensão e gestão de fenômenos espacialmente distribuídos, fornecendo ferramentas valiosas para lidar com a variabilidade e a incerteza inerentes a esses sistemas complexos.

O Cumulative Rainfall Departure (CRD) é uma técnica utilizada para analisar a variabilidade da precipitação em relação à média histórica, permitindo identificar períodos de excesso ou déficit de chuvas (Weber; Stewart, 2004). Essa ferramenta é importante para a gestão dos recursos hídricos, pois auxilia na compreensão dos padrões de variabilidade da precipitação e na detecção de possíveis mudanças no regime hidrológico de uma região (Cui *et al.*, 2017). O CRD é calculado a partir do acúmulo dos desvios da precipitação em relação à média de longo prazo, sendo que valores positivos indicam períodos chuvosos, enquanto valores negativos apontam para períodos secos (Xu; Tonder, 2001).

A implementação de práticas de manejo baseadas em dados de monitoramento contínuo é essencial para assegurar a sustentabilidade da agricultura na área monitorada. Este trabalho contribui para o corpo de conhecimento sobre gestão de recursos hídricos em regiões semiáridas, oferecendo análises valiosas para o planejamento e implementação de estratégias que promovam a segurança hídrica no semiárido brasileiro.

2 Material e métodos

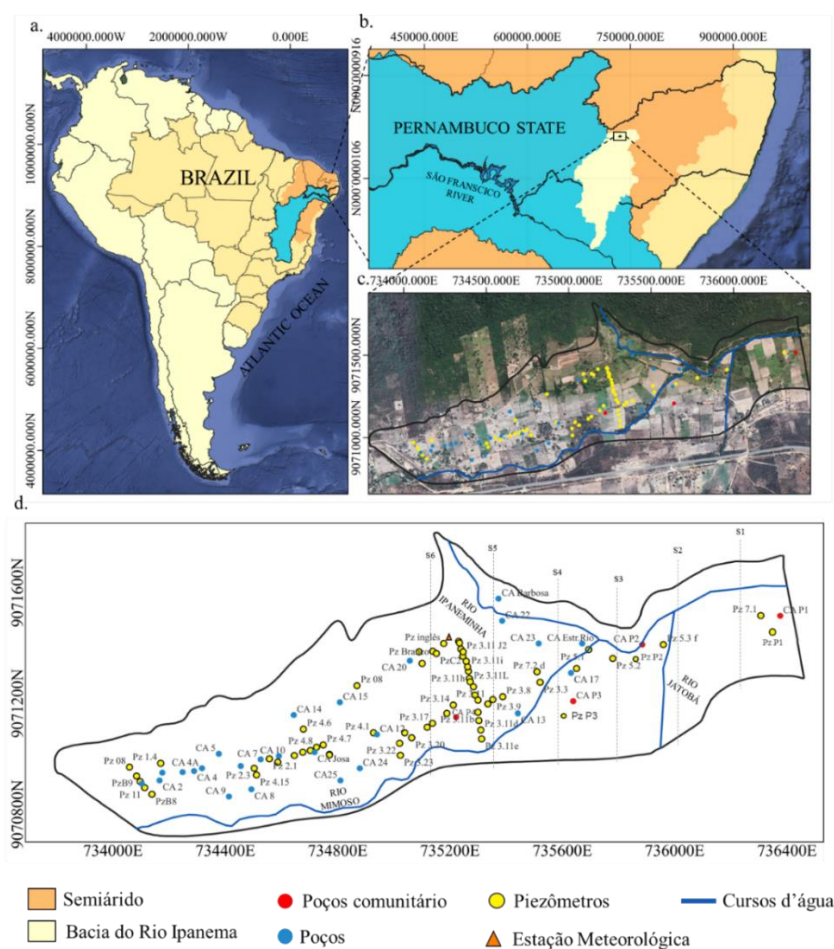
2.1 Localização e caracterização da área de estudo

O estudo foi realizado em um vale aluvial situado na Bacia do Riacho Mimoso, uma sub-bacia do Alto Ipanema, no município de Pesqueira, Agreste pernambucano, Brasil. De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo BSsh (extremamente quente, semiárido), com uma pluviometria

anual média de 630 mm. O aquífero possui uma espessura média de aproximadamente 10 m, com cerca de 3 km de extensão e 300 m de largura, apresentando um declive topográfico de cerca de 0,3% (Oeste-Leste), o que induz um fluxo subterrâneo natural na mesma direção (Montenegro *et al.*, 2003).

A bacia do Riacho Mimoso é composta pelos riachos Mimoso, Ipaneminha e Jatobá, sendo o riacho Mimoso o principal veio de água da região, com fluxo intermitente (Montenegro; Montenegro, 2006). A área de estudo inclui uma rede de poços de bombeamento e piezômetros georreferenciados, cada piezômetro com aproximadamente 6 m de profundidade e um diâmetro de 75 mm (Montenegro, 1997). Alguns pontos monitorados até o ano de 2019 não estavam mais acessíveis a partir de 2022, principalmente piezômetros que foram danificados durante o período pandêmico. Na Figura 2 tem-se a área de estudo com os pontos de monitoramentos instalados.

Figura 2- Mapa de localização do vale aluvial do Riacho Mimoso, bacia do Alto Ipanema, município de Pesqueira-PE.



Fonte: Adaptada de Almeida *et al.* (2024).

Um dos poços monitorados no estudo é do tipo Amazonas, com um diâmetro de 1,2 m e uma profundidade de 16 m. Neste poço, foi instalado um sensor de nível da Ampeq. Este equipamento é capaz de captar, armazenar e disponibilizar as informações sobre o monitoramento do nível de água e é composto por: datalogger, sensor, cabeamento que interliga o sensor e o datalogger. O software específico da AMPEQ permite a transmissão dos dados ao computador, via cabo USB. O sensor de nível da Ampeq é um dispositivo capaz de registrar variações no nível da água em intervalos regulares, fornecendo dados essenciais para a análise da dinâmica hídrica do aquífero (Barros *et al.*, 2024), o que permite a avaliação contínua permitindo verificar a variação no nível do aquífero.

O sensor foi configurado para registrar dados a cada 5 minutos. A instalação deste sensor foi crucial para monitorar as flutuações no nível da água, especialmente em períodos de seca e após eventos de precipitação, permitindo uma compreensão detalhada dos processos de recarga e rebaixamento do aquífero, e de flutuações devido ao bombeamento. O monitoramento com esse equipamento iniciou-se em abril de 2022.

2.2 Monitoramento do vale aluvial

O monitoramento do vale aluvial é realizado desde o ano de 1995, sendo realizado de forma mensal com a leitura do nível da água nos piezômetros e poços, além da coleta de amostras da água para leitura da condutividade elétrica (CE), posteriormente, após o período pandêmico, a leitura do pH foi introduzida na rotina de monitoramento.

A coleta dos dados hidrológicos, incluindo o nível da água, a CE e o pH, foi realizada mensalmente. Os dados de nível da água e CE foram interrompidos em 2020 devido a pandemia de COVID-19. Após o período mais crítico da pandemia o monitoramento começou a ser retomado mensalmente a partir de setembro de 2022. A leitura do pH foi introduzida na rotina de monitoramento em maio de 2023, visando ampliar a caracterização da qualidade da água no vale aluvial. Para dados desse estudo, foram adotados os monitoramentos disponíveis para o ano de 2023. No entanto, devido a questões operacionais, não foi possível efetuar o monitoramento nos meses de fevereiro e abril.

Os dados meteorológicos, incluindo precipitação, temperatura mínima, temperatura média e temperatura máxima, foram obtidos através de duas fontes: i) a fonte primária de coleta foi uma estação meteorológica automática fabricada pela *Campbell Scientific*, instalada no vale aluvial; ii) a segunda fonte de dados foram os registros da estação automática Vaissala instalada em Arcoverde-PE, através do website oficial do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), de onde foram extraídas as mesmas variáveis meteorológicas para o preenchimento de falhas de medição na estação no período de 2000 até 2023.

A evapotranspiração de referência (ET_0) foi calculada seguindo o Método de Penman-Monteith, proposto pela Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO, 1994), conforme apresentado na Equação 1. Para a aplicação deste método, foram utilizados os dados climatológicos provenientes da estação meteorológica automática instalada na área de estudo e os dados obtidos através do website oficial do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

$$ET_0 = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T + 273} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)} \quad (1)$$

onde, ET_0 = evapotranspiração de referência (mm/dia); Δ = tangente da curva de pressão de vapor (kPa/°C); R_n = radiação útil na superfície da cobertura vegetal (MJ/(m²/d)); G = densidade do fluxo de calor no solo (MJ/(m²/d)); γ = constante psicrométrica (kPa/°C); T = temperatura média diária a 2 m de altitude (°C); u_2 = velocidade do vento a 2 m de altitude (m/s); e_s = pressão do vapor de saturação (kPa); e_a = pressão de vapor (kPa).

O estudo do Cumulative Rainfall Departure (CRD) foi realizado no vale durante o período de janeiro de 2000 a dezembro de 2023. A precipitação média histórica anual da região varia entre 400 e 800 mm, servindo como base de comparação para a análise do CRD. O cálculo do CRD é realizado pela diferença acumulada entre a precipitação observada e a precipitação média de longo prazo para cada intervalo de tempo, baseado na fórmula desenvolvida por Bredenkamp et al. (1995), conforme apresentado na Equação 2, que fornece uma abordagem para calcular a recarga de águas subterrâneas em função das precipitações

mensais e atividades de extração. Esse método permite identificar períodos de déficit ou excesso de chuvas em relação à média histórica.

$${}_{av}^1CRD_i = \sum_{n=1}^i R_n - \kappa \sum_{n=1}^i R_{av} \quad (2)$$

onde, R_n representa a quantidade de chuva no mês n e "av" a média. O fator κ , definido como $\kappa = 1 + (Qp + Qo)/(AR_{av})$, indica a presença de bombeamento quando maior que 1, enquanto $\kappa=1$ sugere que não há bombeamento. A relação linear entre o CRD e a variação mensal do nível da água é expressa pela equação 3

$$\Delta h_i = (r/S)({}_{av}^1CRD_i) \quad (3)$$

onde r é a porcentagem do CRD resultante da recarga da precipitação e S é a capacidade de armazenamento. Este modelo permite que gestores de recursos hídricos analisem como as variações de chuva influenciam os níveis de água subterrânea, sendo particularmente útil em áreas onde a previsão dos níveis dos aquíferos é crucial para a sustentabilidade hídrica.

De acordo com Glantz e Ramírez (2020), o Oceanic Niño Index (ONI) é o principal indicador para monitorar El Niño e La Niña, calculado na região do Niño 3.4 (Barnston *et al.*, 1999) usando anomalias de temperatura na superfície do mar. A metodologia ONI está disponível no site do Climate Prediction Center (CPC) da NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, 2020). Tem-se o El Niño quando o ONI é $\geq 0,5$ °C por 5 trimestres consecutivos, e La Niña quando o ONI é $\leq -0,5$ °C pelo mesmo período (McPhaden *et al.*, 2006).

2.3 Estimativa de bombeamento para irrigação

Para estimar as taxas de exploração potenciais dos poços comunitários e cacimbões no vale aluvial, considerou-se o consumo efetivo baseado na necessidade hídrica das culturas em cada lote irrigado, levando em conta a rotação de culturas em alguns lotes ao longo do ano.

Os dados de cultivo e tempo de irrigação foram coletados mensalmente com os agricultores locais, assim como o método de irrigação, o que possibilitou

estimar a extração mensal de água nos poços para irrigação dos lotes. Para o cálculo da demanda hídrica utilizada na irrigação, utilizou-se a equação 4:

$$Q = [(Etr * Kc) - P] * 10^3 * (Área * 10^4 * \eta) \quad (4)$$

onde, Q= Vazão extraída (m³/dia); Etr = Evapotranspiração de referência (mm); Kc = coeficiente da cultura; P= Precipitação (mm); Área = Área irrigada pelos poços (ha); η = Eficiência do sistema de irrigação (utilizou-se 70%).

O coeficiente de cultura (Kc) é um parâmetro adimensional que representa a relação entre a evapotranspiração de uma cultura específica e a evapotranspiração de referência (Allen *et al.*, 1998). Os valores de Kc foram obtidos através de uma pesquisa bibliográfica, conforme apresentado na Tabela 1. Para os valores da evapotranspiração de referência, utilizou-se o método de Penman-Monteith da FAO, utilizando os dados climatológicos registrados na estação de monitoramento localizada na região.

Tabela 1 - Coeficiente das culturas cultivadas no Vale Aluvial.

Culturas	Kc				Fonte
	Inicial	Cresc.	Matur.	Colheita	
Bananeira	0,50	0,75	1,10	1,00	Allen <i>et al.</i> (1998)
Capim	0,30	0,75	0,75	**	Allen <i>et al.</i> (1998)
Cenoura	0,55	0,80	1,05	0,80	Allen <i>et al.</i> (1998)
Coentro	0,82	1,03	1,07	0,93	Da Silva <i>et al.</i> (2013)
Feijão	0,35	0,70	1,00	0,80	Allen <i>et al.</i> (1998)
Goiaba	0,75	0,84	0,81	0,67	Bassoi <i>et al.</i> (2007)
Manga	0,80	0,90	0,80	0,60	Teixeira <i>et al.</i> (2008)
Maxixe	0,60	1,00	0,75	**	Allen <i>et al.</i> (1998)
Palma	0,38	0,56	0,81	0,91	Divincula <i>et al.</i> (2019)
Pastagem	0,50	0,90	0,85	**	Allen <i>et al.</i> (1998)
Pimentão	0,50	0,60	1,10	0,85	Allen <i>et al.</i> (1998)
Quiabo	0,50	0,80	1,00	0,30	Gondim <i>et al.</i> (2014)
Repolho	0,45	0,75	1,00	0,80	Allen <i>et al.</i> (1998)
Tomate	0,45	0,75	1,15	0,65	Allen <i>et al.</i> (1998)

** Não disponível

Fonte: Adaptada de Almeida *et al.* (2024)

A estimativa do uso e ocupação do solo na região de estudo foi realizada por meio de técnicas de sensoriamento remoto, utilizando o software QGIS. Foram utilizadas imagens de satélite de alta resolução espacial do período de 2000 a 2023, correspondente ao período de análise do Cumulative Rainfall Departure (CRD). Além disso, foram realizadas visitas de campo para a coleta de pontos de controle e validação da classificação, bem como para a aplicação de questionários para coleta de dados de práticas agrícolas, cultivo e histórico de uso da área.

2.4 Análise estatística e geoestatística do monitoramento

Os dados foram analisados de acordo com a estatística clássica, a fim de verificar seu comportamento em relação às medidas estatísticas de posição e de variabilidade, utilizando uma planilha eletrônica. Foi aplicado o teste de Kolmogorov-Smirnov para avaliar a distribuição dos dados em relação à

distribuição Normal. Com base nos valores do coeficiente de variação (CV), a variabilidade foi classificada, segundo Warrick e Nielsen (1998), em três categorias: baixa ($CV \leq 12\%$), média ($12\% < CV \leq 60\%$) e alta variabilidade ($CV > 60\%$).

O método de Hoaglin *et al.* (1992) é utilizado para filtrar dados discrepantes, sendo fundamental para melhorar a precisão estatística, detectar erros de dados, e garantir análises robustas, ao mesmo tempo que ajuda na identificação de fenômenos incomuns. Este método é eficaz na identificação de outliers, minimizando distorções em resultados estatísticos e contribuindo para a qualidade e precisão das análises de dados. O critério de Hoaglin *et al.* (1992) remove os outliers, valores que estão abaixo do limite inferior (Li) e acima do limite superior (Ls), esses valores são estimados pelas equações a seguir:

$$Li = Qi - 1,5AP \quad (5)$$

$$Ls = Qs + 1,5AP \quad (6)$$

onde, Li = limite inferior; Ls = limite superior; Qi = quartil inferior; Qs = quartil superior; AP = amplitude entre o 1ª e o 3ª quartil.

Para a análise geoestatística, utilizou-se a ferramenta geoestatística GEOEAS. A dependência espacial da salinidade e da condutividade hidráulica foi analisada através do semivariograma clássico construído a partir das semivariâncias, dada pela Equação 7 (Journel, 1989).

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^n [Z(X_i + h) - Z(X_i)]^2 \quad (7)$$

onde, $\hat{\gamma}(h)$ = valor estimado da semivariância; $Z(x_i + h)$ e $Z(x_i)$ = valores observados da variável regionalizada; e $N(h)$ = número de pares de valores medidos com discretização h.

Após a obtenção do semivariograma experimental, foi realizado o ajuste dos dados a um modelo teórico, testando-se os modelos exponencial, gaussiano

e esférico. Ajustar matematicamente os dados permite definir parâmetros importantes, tais como o efeito pepita (C_0), o alcance da dependência espacial (A) e o patamar (C_0+C_1). A seguir, apresentam-se os três modelos teóricos considerados, com suas respectivas equações (Equações 8, 9, 10 e 11):

Modelo Exponencial:

$$\hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1 \left[1 - e^{-\left(\frac{h}{A}\right)} \right] \quad h \neq 0 \quad (8)$$

Modelo Gaussiano:

$$\hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1 \left[1 - e^{-\left(\frac{h^2}{A^2}\right)} \right] \quad h \neq 0 \quad (9)$$

Modelo Esférico:

$$\hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1 \left[1,5 \frac{h}{A} - 0,5 \left(\frac{h}{A} \right)^3 \right] \quad 0 < h < A \quad (10)$$

$$\hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1 \quad h > A \quad (11)$$

O modelo passou pela validação segundo a técnica de Leave-one-out (Webster; Oliver, 2007), sendo escolhido o modelo com o melhor ajuste aos valores experimentais, com os valores medidos pela técnica da krigagem.

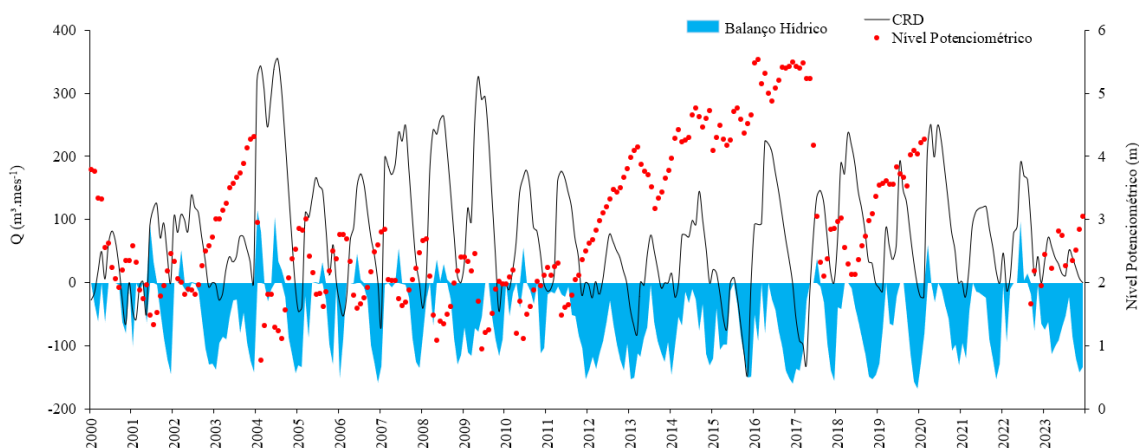
O Índice de Dependência Espacial (IDE) é um parâmetro crucial na análise geoestatística, calculado como a razão entre o efeito pepita (C_0) e o patamar (C_0+C_1) dos semivariogramas teóricos, de acordo com Cambardella *et al.* (1994), ele estabelece uma classificação quantitativa da força da dependência espacial nos dados. Quando a razão entre o efeito pepita e o patamar é inferior a 25%, indica uma forte dependência espacial, o que sugere que as amostras próximas entre si apresentam semelhanças marcantes. Já quando essa razão se encontra entre 25 e 75%, reflete uma dependência espacial moderada, sugerindo que as amostras próximas tendem a ser semelhantes, mas com menor intensidade do que no caso de forte dependência. Por fim, quando a razão é superior a 75%, indica uma dependência espacial fraca, o que sugere que as amostras próximas entre si não apresentam semelhanças significativas.

3 Resultados e discussão

3.1 Variabilidade do CRD e Precipitação no vale aluvial

A análise da variabilidade do CRD e da precipitação no vale aluvial é fundamental para compreender a dinâmica hídrica da região. Na Figura 3 observa-se a variação do CRD, do nível de água subterrânea médio, e do balanço hídrico em relação a precipitação e a evapotranspiração do ano 2000 até 2023.

Figura 3 - Gráfico da variação do CRD, nível médio do lençol freático e balanço hídrico de 2000 a 2023.



Fonte: o autor (2024)

Percebe-se que em períodos de desvios positivos e picos elevados do CRD, o nível potenciométrico médio tende a apresentar valores menores, indicando uma maior proximidade do lençol freático à superfície. Por outro lado, em períodos de menor intensidade do CRD ou até mesmo desvios negativos, o nível potenciométrico aumenta, ficando mais distante da superfície de referência.

Essa variação do CRD pode estar relacionada a diversos fatores, como a variabilidade interanual da precipitação e a ocorrência de eventos climáticos extremos. O balanço hídrico representa a diferença entre a precipitação observada e a evapotranspiração, valores positivos indicam períodos em que a chuva na região foi maior que a evapotranspiração, valores elevados de precipitação contribuem para desvios positivos no CRD. Por outro lado, valores negativos representam os períodos em que a precipitação observada foi inferior à média evapotranspiração, contribuindo para desvios negativos do CRD.

A precipitação é o principal fator que influencia o CRD. Na Tabela 2 tem-se as médias mensais de precipitação (P) e evapotranspiração de referência (ET_0) para o vale aluvial. A precipitação representa a quantidade de água que chega à superfície terrestre através da chuva, enquanto a evapotranspiração de referência indica a demanda atmosférica por água, considerando uma superfície de referência padronizada (Allen *et al.*, 1998).

Tabela 2 - Média histórica mensal da precipitação e evapotranspiração

Mês	P (2000-2019)	ET_0 (2000-2019)	P* (2020)	P* (2021)	P* (2022)	P* (2023)
	mm	mm	mm	mm	mm	mm
janeiro	70,3	154,3	28,0	41,4	134,6	53,6
fevereiro	74,0	137,6	54,4	12,7	27,7	53,8
março	83,6	147,4	285,7	79,4	109,0	2,1
abril	92,9	127,5	98,1	110,0	157,6	0,8
maio	69,4	106,0	2,8	72,6	99,4	7,4
junho	90,4	86,4	105,5	32,2	186,6	2,4
julho	69,6	92,3	32,3	41,0	66,7	14,8
agosto	38,8	110,1	8,7	38,7	83,2	57,6
setembro	16,8	138,6	6,1	2,8	16,6	6,7
outubro	13,4	162,0	4,8	8,1	5,5	0,8
novembro	18,9	163,4	25,0	0,3	154,2	1,3
dezembro	43,4	161,4	3,0	21,8	8,6	10,6

P = média histórica da precipitação mensal do ano 2000 a 2019; ET_0 = média histórica da evapotranspiração mensal do ano 2000 a 2019; P*(2023) = Precipitação mensal para o ano de 2023

Fonte: o autor (2024)

Ao analisar os dados da Tabela 2, observa-se uma variação sazonal tanto da precipitação quanto da ET_0 ao longo do ano. Os meses de abril e junho apresentam os maiores valores históricos de precipitação média, com 92,9 mm e 90,4 mm, respectivamente. Por outro lado, os meses de setembro, outubro e novembro registram os menores valores de precipitação, com 16,38 mm, 13,4 mm e 18,9 mm, respectivamente.

Em relação à ET_0 , nota-se uma tendência de valores mais elevados nos meses de outubro a março, com o pico em novembro (163,4 mm). Esses meses correspondem ao período de maior demanda atmosférica por água. Já os meses

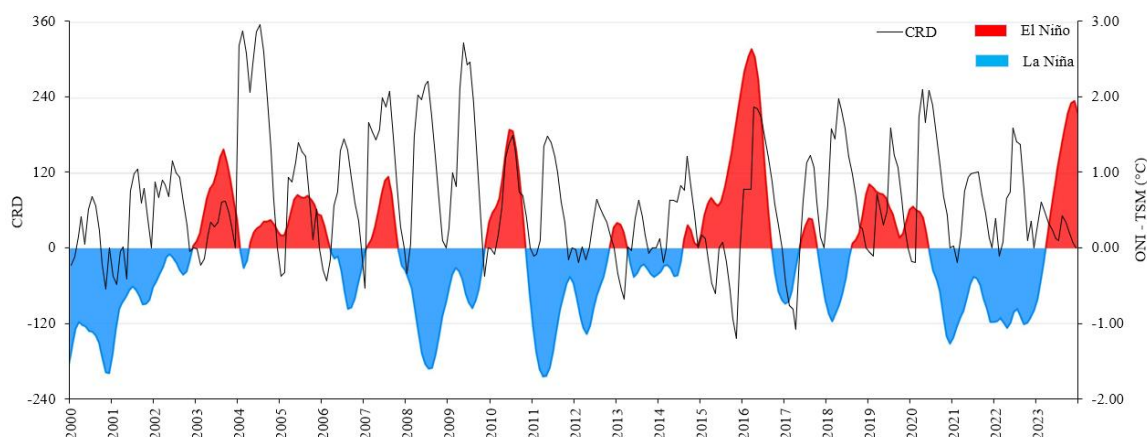
de maio a julho apresentam os menores valores de ET_0 , indicando uma menor demanda atmosférica por água nesse período.

Ao comparar os valores de precipitação e ET_0 na Tabela 2, observa-se que em todos os meses a ET_0 é superior à precipitação. Isso indica que, para o local em questão, há uma tendência de déficit hídrico ao longo do ano, com maior intensidade nos meses de setembro a dezembro, quando a diferença entre a ET_0 e a precipitação é mais acentuada.

O mês de março de 2020 destaca-se pela elevada precipitação, 285,7 mm que é quase 3,5 vezes maior que a média apresentada. No ano de 2022, os meses de janeiro, junho e novembro apresentaram precipitação intensa e acima da média, com grade destaque para novembro com 154,2 mm o que representa mais de 8 vezes a precipitação média histórica.

Além da precipitação, os eventos climáticos, como El Niño e La Niña, também podem influenciar o CRD. Na Figura 4 observa-se a relação entre o CRD e o Índice Oceânico Niño (ONI), utilizado para identificar a ocorrência desses eventos, a Tabela 3 apresenta os períodos de ocorrência do El Niño e da La Niña com a precipitação acumulada no período, além de uma precipitação histórica acumulada e a anomalia entre o valor registrado e a média histórica.

Figura 4 – Análise do CRD e ocorrência de El Niño e La Niña.



Fonte: o autor (2024).

Tabela 3 – Análise de precipitação em períodos de ocorrência do El Niño.

Período	Fenômeno	Intensidade	P acum	P HMA	Anom. P
			mm	mm	mm
Jan/00 - Abr/00	La Niña	Moderado	332,9	302,6	30,3
Mai/00 - Mar/01	La Niña	Fraco	676,1	566,4	109,7
Jul/02 - Set/02	El Niño	Fraco	64,3	126,4	-62,1
Out/02 - Jan/03	El Niño	Moderado	97,5	122,8	-25,3
Fev/03 - Mar/03	El Niño	Fraco	67,5	168,5	-101
Set/04 - Mar/05	El Niño	Fraco	334,7	307,6	27,1
Dez/05 - Mar/06	La Niña	Fraco	119,7	269,7	-150
Nov/06 - Fev/07	El Niño	Fraco	366,2	176,3	189,9
Ago/07 - Set/07	La Niña	Fraco	104,4	60,5	43,9
Out/07 - Abr/08	La Niña	Moderado	571,2	354,4	216,8
Mai/08 - Jul/08	La Niña	Fraco	229,7	214,6	15,1
Dez/08 - Abr/09	La Niña	Fraco	706,7	332,8	373,9
Set/09 - Nov/09	El Niño	Fraco	20,8	37,9	-17,1
Dez/09 - Mar/10	El Niño	Moderado	361,9	269,7	92,2
Abr/10	El Niño	Fraco	110,3	63,1	47,2
Jul/10	La Niña	Fraco	78,8	65,9	12,9
Ago/10 - Mar/11	La Niña	Moderado	346,3	351,8	-5,5
Abr/11 - Out/11	La Niña	Fraco	454,2	353,4	100,8
Nov/11 - Jan/12	La Niña	Moderado	98,9	107,6	-8,7
Fev/12 - Abr/12	La Niña	Fraco	50,2	231,6	-181,4
Dez/14 - Mai/15	El Niño	Fraco	152,7	397	-244,3
Jun/15 - Set/15	El Niño	Moderado	187	210,9	-23,9
Out/15 - Mar/16	El Niño	Forte	407,3	291,3	116
Abri/16 - Jun/16	El Niño	Moderado	225,3	211,8	13,5
Set/16 - Jan/17	La Niña	Fraco	4,4	139,1	-134,7
Nov/17 - Abr/18	La Niña	Fraco	480,6	339,2	141,4
Nov/18 - Jun/19	El Niño	Fraco	433,9	487,9	-54
Dez/19 - Fev/20	El Niño	Fraco	101,8	166,9	-65,1
Set/20 - Out/20	La Niña	Fraco	10,9	31,5	-20,6
Nov/20 - Fev/21	La Niña	Moderado	82,1	173,3	-91,2
Mar/21 - Nov/21	La Niña	Fraco	385,1	462,6	-77,5
Dez/21 - Jun/22	La Niña	Moderado	736,7	481,5	255,2
Jul/22 - Fev/23	La Niña	Fraco	442,2	314,9	127,3
Jun/23 - Jul/23	El Niño	Fraco	17,3	150,4	-133,1
Ago/23 - Dez/23	El Niño	Moderado	76,6	112,3	-35,7

P acum = precipitação acumulada no período; P HMA = precipitação histórica média acumulada; An. P = Anomalia da Precipitação no período.

Fonte: o autor (2024).

A análise comparativa dos períodos de El Niño e La Niña na região de estudo revela padrões distintos de anomalias de precipitação. Durante os eventos de El Niño, observou-se uma variabilidade significativa, com 56% dos períodos apresentando anomalias negativas e 44% apresentando anomalias positivas. Já durante os eventos de La Niña, 53% dos períodos apresentaram anomalias positivas, enquanto 47% tiveram anomalias negativas.

Essa diferença nos padrões de anomalias de precipitação pode ser atribuída às características distintas desses fenômenos. O El Niño está associado ao aquecimento anômalo das águas superficiais do Oceano Pacífico equatorial, enquanto o La Niña está relacionado ao resfriamento anômalo dessas águas (Grimm, 2003). Essas condições influenciam a circulação atmosférica e a distribuição da precipitação em diferentes regiões do globo, incluindo a área de estudo.

No entanto, é importante ressaltar que a intensidade dos eventos de El Niño e La Niña não apresentou uma relação clara com a magnitude das anomalias de precipitação. Eventos de diferentes intensidades (fraco, moderado) exibiram tanto anomalias positivas quanto negativas, sugerindo que outros fatores, além da intensidade, influenciam a resposta da precipitação a esses fenômenos na região (Kayano; Andreoli, 2007).

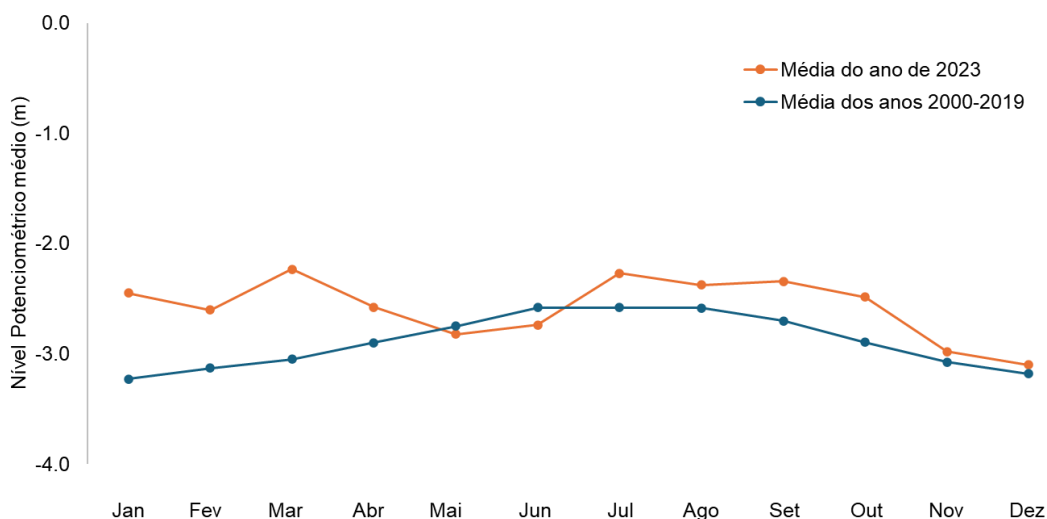
Esses resultados evidenciam a complexa relação entre o CRD, a precipitação e os eventos climáticos no vale aluvial. A compreensão dessa dinâmica é fundamental para o planejamento e a gestão dos recursos hídricos na região, visando à mitigação dos impactos de eventos extremos e à adaptação às mudanças climáticas.

3.2 Variação espacial e temporal do nível potenciométrico

A análise da série temporal do nível potenciométrico foi realizada considerando a média histórica do ano 2000 a 2019 e o monitoramento em 2023. Na Figura 5 observa-se a evolução temporal do nível potenciométrico média mensal para o período do ano 2000 a 2019 e para o monitoramento mensal no ano de 2023, permitindo a identificação de flutuações e tendências ao longo do tempo. A utilização dessa média mensal obtida a partir do monitoramento regular possibilita uma análise mais representativa da variação temporal, uma vez que

suaviza possíveis oscilações diárias e destaca os padrões dominantes em cada mês.

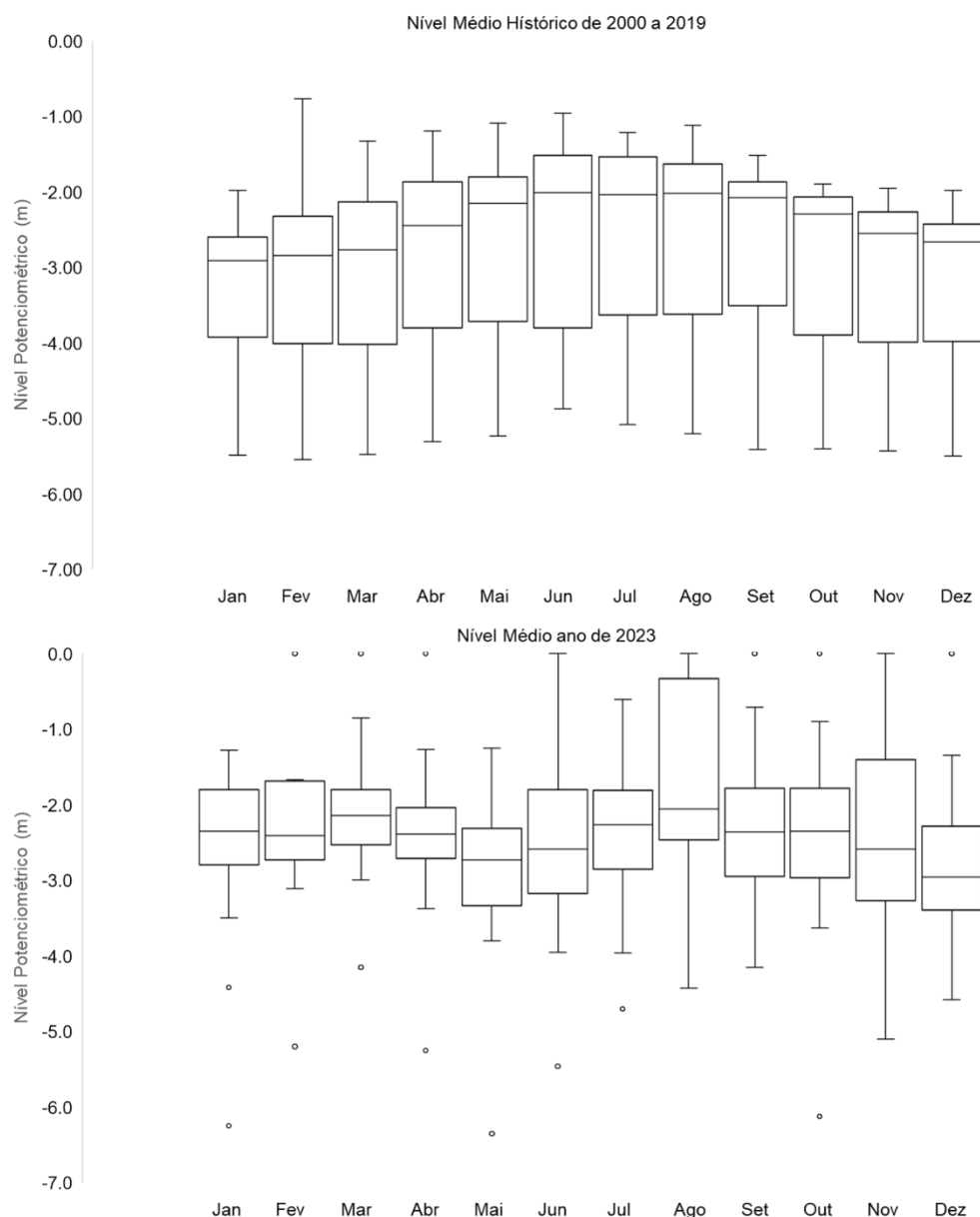
Figura 5 – Série temporal para o nível potenciométrico no Vale do Mimoso, média mensal dos anos 2000 a 2019 e média mensal do ano de 2023.



Fonte: o autor (2024).

Com o intuito de investigar possíveis alterações nos padrões de variação do nível potenciométrico em função da enchente ocorrida em março de 2023, foram elaborados box-plots comparativos entre os valores observados para o período do ano 2000 a 2019 e para o ano de 2023. Essa análise permite identificar se houve mudanças significativas na distribuição dos dados entre esses dois períodos distintos. Na Figura 6 exibe-se os box-plots resultantes dessa análise comparativa, fornecendo informações relevantes sobre a dinâmica do nível potenciométrico.

Figura 6 – Box-Plots da série potenciométrica do Vale do Mimoso com a média do ano 2000 a 2019 e para o ano de 2023.



Fonte: o autor (2024).

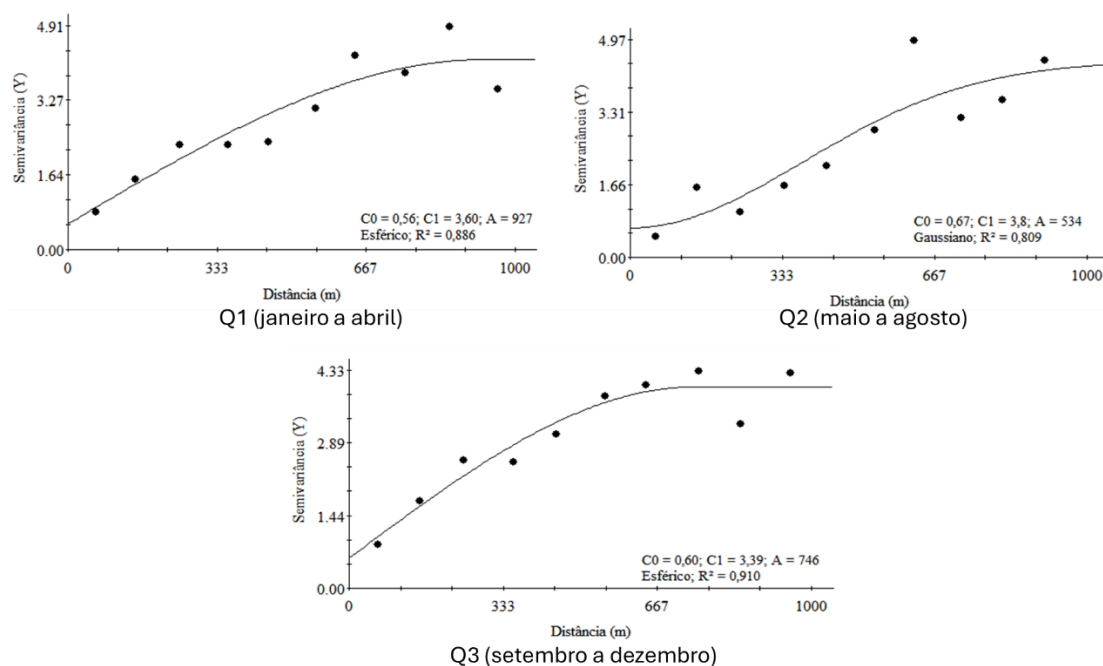
As análises da série temporal e dos box-plots fornecem uma base para a compreensão da variação temporal do nível potenciométrico no Vale do Mimoso. Percebe-se uma elevação na cota potenciométrica média ao longo do tempo. Essas informações são fundamentais para embasar a investigação subsequente da variação espacial desse parâmetro hidrogeológico na área de estudo.

A análise da variação espacial e temporal do nível potenciométrico na região de estudo possibilita a compreensão da dinâmica dos recursos hídricos subterrâneos e os fatores que influenciam sua disponibilidade. Para representar

a potenciometria, foram elaborados semivariogramas e mapas de krigagem para o ano de 2023 e para o ano de 2019.

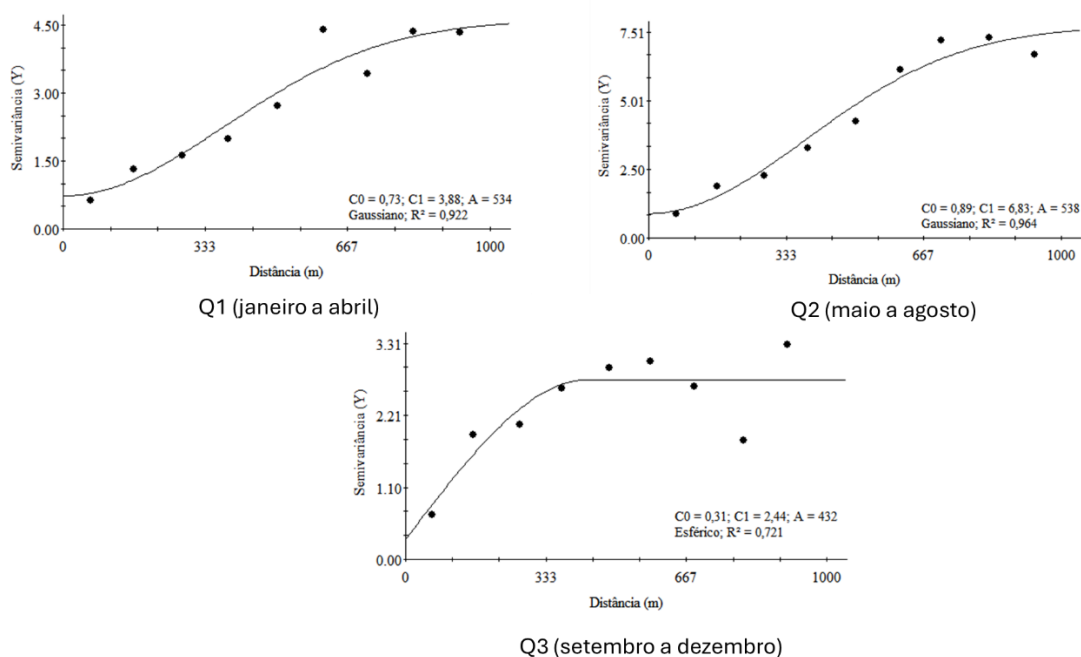
Os semivariogramas foram utilizados para avaliar a dependência espacial do nível potenciométrico em cada período (Fletcher; Fortin, 2018). Nas Figuras 7 e 8 tem-se os semivariogramas experimentais e os modelos teóricos ajustados para média de períodos quadrimestrais no ano de 2019 e para o ano de 2023, respectivamente.

Figura 7 – Semivariogramas experimentais e modelos teóricos ajustados para a cota potenciométrica por quadrimestre para o ano de 2019.



Fonte: o autor (2024).

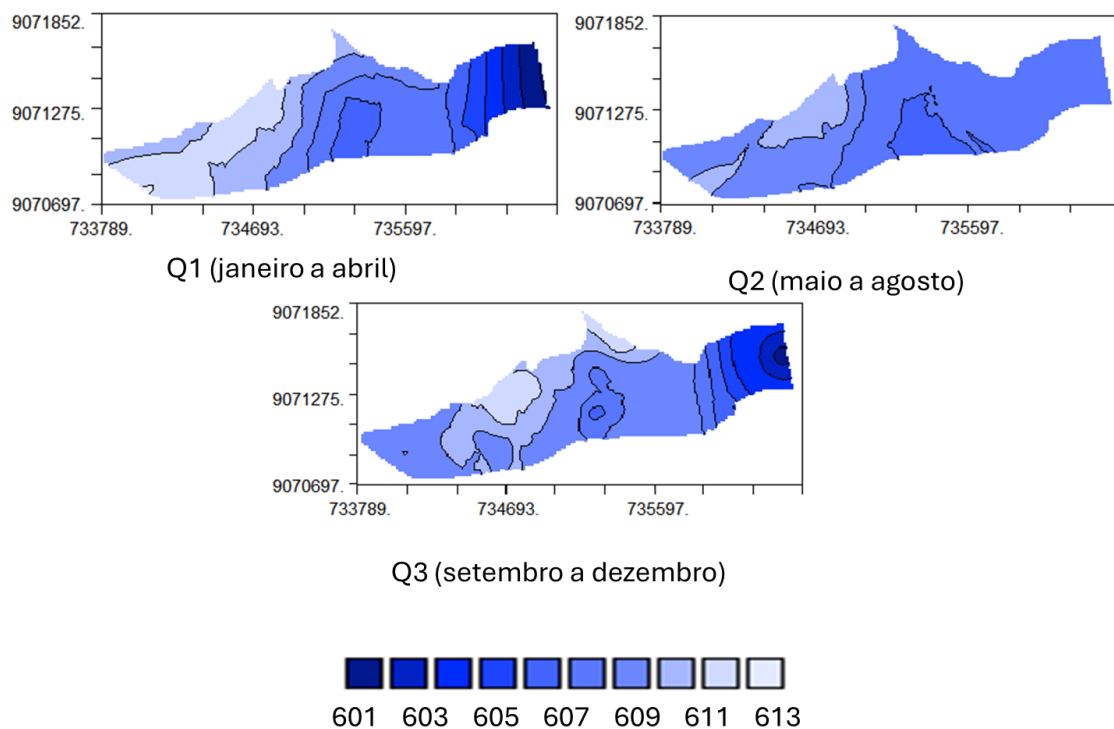
Figura 8 - Semivariogramas experimentais e modelos teóricos ajustados para a cota potenciométrica por quadrimestre para o ano de 2023.



Os semivariogramas foram ajustados em modelos gaussianos e esférico, indicando a presença de dependência espacial do nível potenciométrico em todos os períodos analisados, com alcances variando de 534 a 927 metros e de 432 a 538 metros, para 2019 e 2023, respectivamente. Os semivariogramas foram validados pela análise de Leave-one-out, sendo para o ano de 2019, com desvio padrão próximo a um (1,14; 1,23; 0,98) e erros médios próximo a zero (0,09; -0,07; 0,02), e no ano de 2023 com desvio padrão próximo a um (1,33; 1,25; 1,26) e erros médios próximo a zero (0,20; -0,14; -0,03). Esses resultados sugerem que a variabilidade espacial do nível potenciométrico é influenciada por fatores locais, como a heterogeneidade do aquífero e a distribuição das áreas de recarga e descarga (Pang *et al.*, 2023).

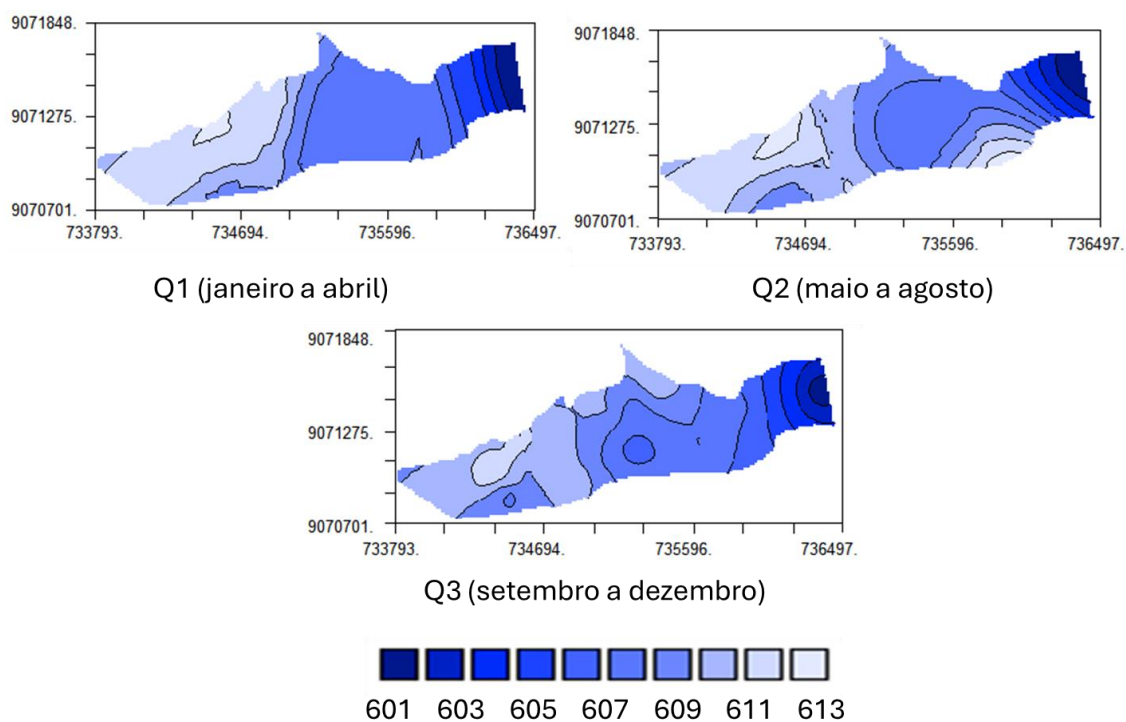
Com base nos semivariogramas foram elaborados mapas de krigagem para representar a distribuição espacial da cota potenciométrica por quadrimestre no ano de 2019 e no ano de 2023, Figuras 9 e 10, respectivamente.

Figura 9 - Mapas de cotas potenciométricas (m) por quadrimestre para o ano de 2019.



Fonte: o autor (2024).

Figura 10 - Mapas de cotas potenciométricas (m) por quadrimestre para o ano de 2023.



Fonte: o autor (2024).

Os mapas de krigagem revelam uma variação da cota potenciométrica ao longo do ano para os períodos analisados. Observa-se que, no primeiro quadrimestre de 2023, o nível potenciométrico é mais elevado em comparação ao mesmo período de 2019. Essa variação pode ser atribuída ao volume de precipitação antes da coleta de dados, conforme indicado na Tabela 2, sugerindo que a precipitação elevada no mês de novembro de 2022 influenciou diretamente na recarga do aquífero e na elevação de sua cota potenciométrica. Essa análise está alinhada com os resultados de Andrade *et al.* (2012), que destacam a importância das variações sazonais de precipitação na recarga dos aquíferos.

Além disso, a utilização de poços para agricultura irrigada tem um impacto significativo na cota potenciométrica, especialmente na área central e na porção oeste do Vale do Mimoso. Tal impacto é evidenciado pela metodologia de coleta de dados: na região oeste do vale, a coleta é comumente realizada ao final do dia, após a irrigação diária dos lotes agrícolas, enquanto na área leste, a coleta acontece no início do dia, no início das atividades de irrigação. Essa diferença nos procedimentos de coleta de dados revela variações importantes na cota potenciométrica, essenciais para entender as dinâmicas hídricas da região.

A análise por quadrimestres indica um aumento na cota potenciométrica do primeiro para o segundo quadrimestre, seguido por uma redução do segundo para o terceiro quadrimestre. Esse padrão reflete a transição do período mais seco para o chuvoso entre os dois primeiros quadrimestres e, inversamente, do chuvoso para o seco entre os dois últimos quadrimestres. Essa dinâmica sazonal, juntamente com as práticas de irrigação e os padrões de precipitação, desempenha um papel crucial na modulação das cotas potenciométricas ao longo do ano, ressaltando a complexidade das interações entre as atividades humanas e os ciclos naturais de água na região estudada.

Esses resultados evidenciam a importância de considerar a variação espacial e temporal da cota potenciométrica no gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos, levando em conta os padrões históricos de precipitação.

3.3 Distribuição espacial e temporal da condutividade elétrica (CE)

A série do monitoramento de condutividade elétrica (CE) analisada corresponde ao ano de 2023. Os resultados estatísticos são apresentados na Tabela 4. Esta análise compreende medições mensais, destacando variações e

tendências ao comparar com dados de 2019. A estruturação em quadrimestres facilita o entendimento das mudanças sazonais sobre a CE.

Tabela 4 – Estatística descritiva para a condutividade elétrica (CE) no ano de 2023 para valores mensais.

Mês-Ano	CE (dS/m)			
	Média	Máx	Mín	CV (%)
Jan-23	1,22	13,17	0,25	187
Fev-23	1,21	13,71	0,32	133
Mar-23	0,95	5,68	0,48	98
Abr-23	1,02	5,25	0,59	107
Mai-23	0,92	5,87	0,27	98
Jun-23	0,79	5,33	0,37	106
Jul-23	0,95	18,00	0,43	124
Ago-23	1,13	19,12	0,29	140
Set-23	1,22	16,30	0,35	144
Out-23	1,15	22,61	0,50	130
Nov-23	0,97	17,21	0,49	107
Dez-23	1,05	18,24	0,42	134

Máx = valor máximo de CE no mês; Mín = valor mínimo de CE no mês e CV = coeficiente de variação mensal da CE.

Fonte: o autor (2024).

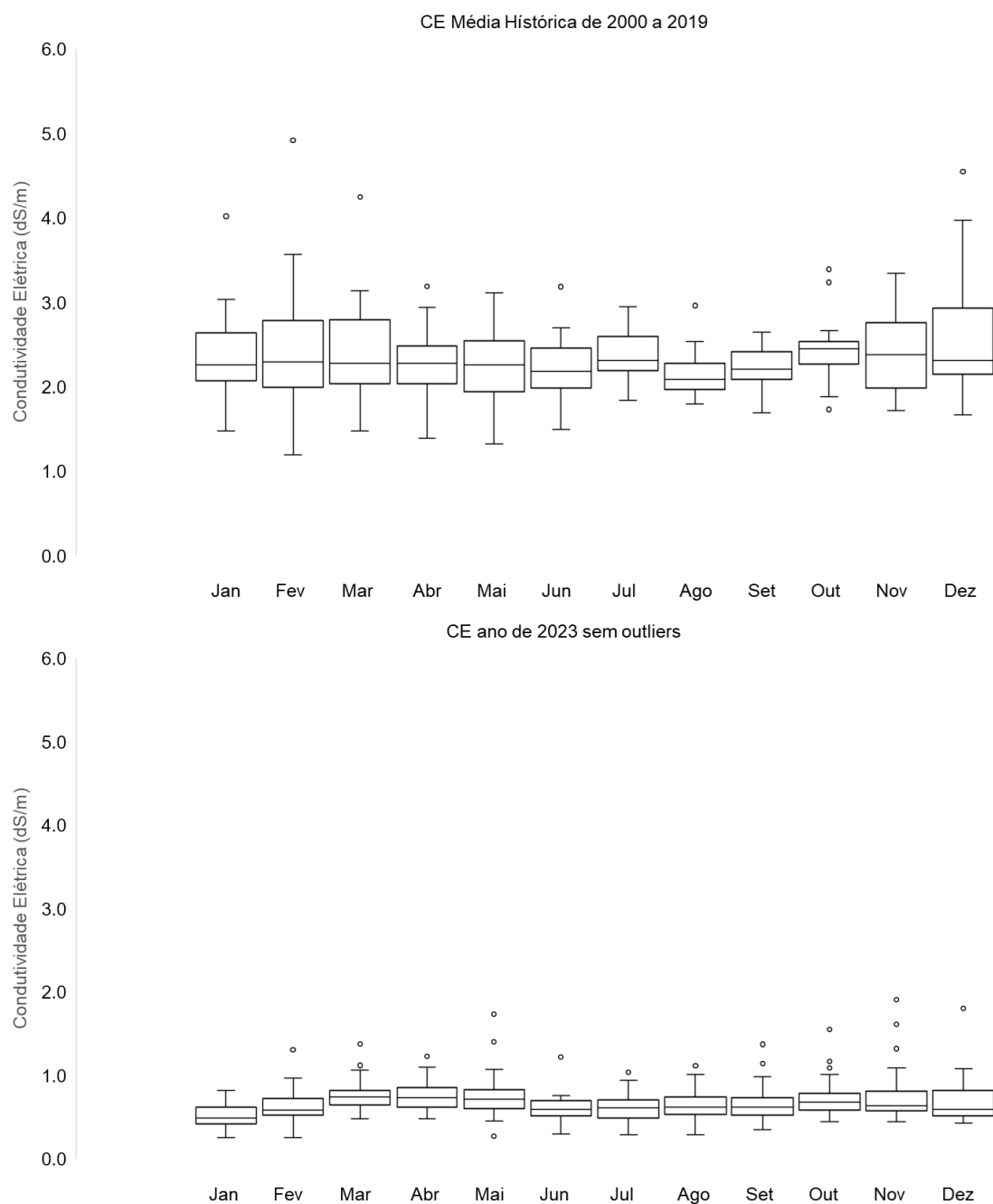
Os valores de condutividade elétrica (CE) em 2023 apresentaram uma variação de 0,25 a 22,61 dS/m, desvio padrão entre 0,84 e 2,28 indicando que alguns meses apresentaram uma alta dispersão dos valores em relação à média, o que é confirmado pelos valores elevados do coeficiente de variação (CV), de maneira similar aos resultados encontrados por Andrade *et al.* (2012) e posteriormente confirmados por Almeida *et al.* (2024), indicando a presença de valores extremos na região.

Conforme Hoaglin *et al.* (1992), realizou-se a filtragem de dados extremos, resultando na identificação de 6 piezômetros com valores extremos de CE ao longo do ano. Os piezômetros excluídos da avaliação inicial estavam localizados na porção central do vale, uma área conhecida por sua alta concentração de

saís, conforme descrito por Montenegro *et al.* (2006) e corroborado por Andrade *et al.* (2012).

Na Figura 11 observa-se os box-plots que ilustram a distribuição temporal da condutividade elétrica, excluindo-se os valores extremos, para os dados médios históricos do período de 2000 a 2019 e para o ano de 2023.

Figura 11 - Box-plots da condutividade elétrica para o período do ano 2000 a 2019 e para o ano de 2023 no Vale aluvial do Mimoso, Pesqueira-PE.



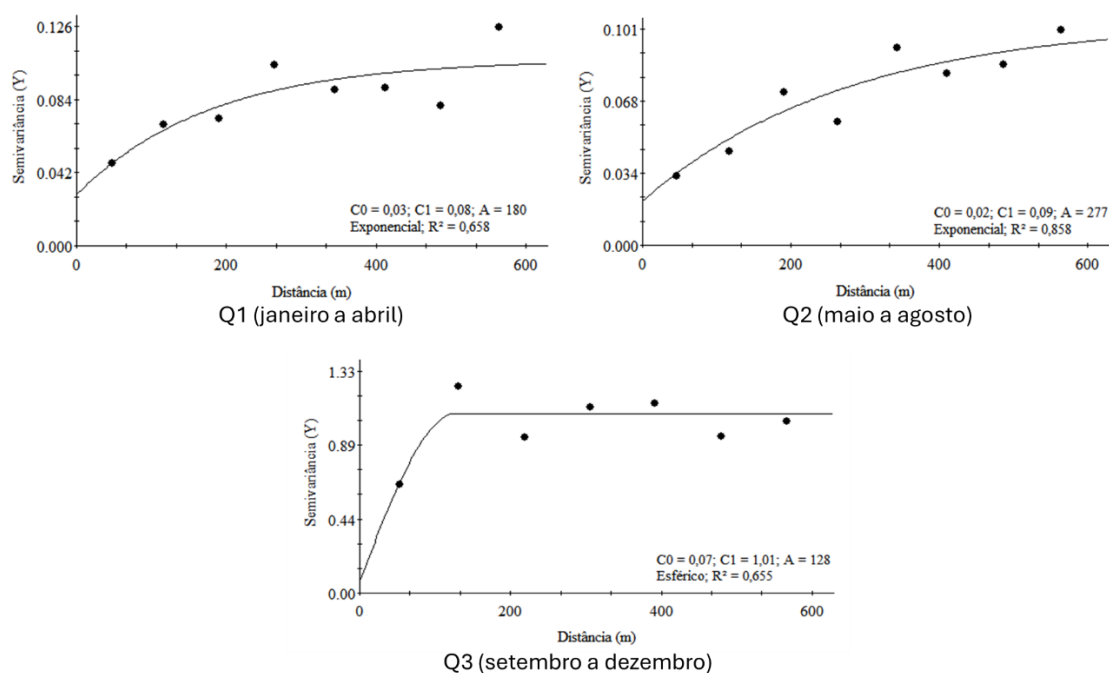
Fonte: o autor (2024).

Os dados filtrados foram utilizados para estimar o semivariograma médio da área. Mesmo com a exclusão de dados extremos, os coeficientes de variação da condutividade elétrica (CE) se mantiveram entre 21% e 33%, indicando uma variação média. A normalização dos dados foi confirmada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov a 5%, com resultados que demonstram a aderência dos dados.

Para aprofundar a análise, os dados de 2023 foram comparados com os valores anuais de 2019, segmentados em quadrimestres, permitindo uma avaliação detalhada das tendências sazonais e das variações temporais na condutividade elétrica, oferecendo uma perspectiva comparativa entre o período.

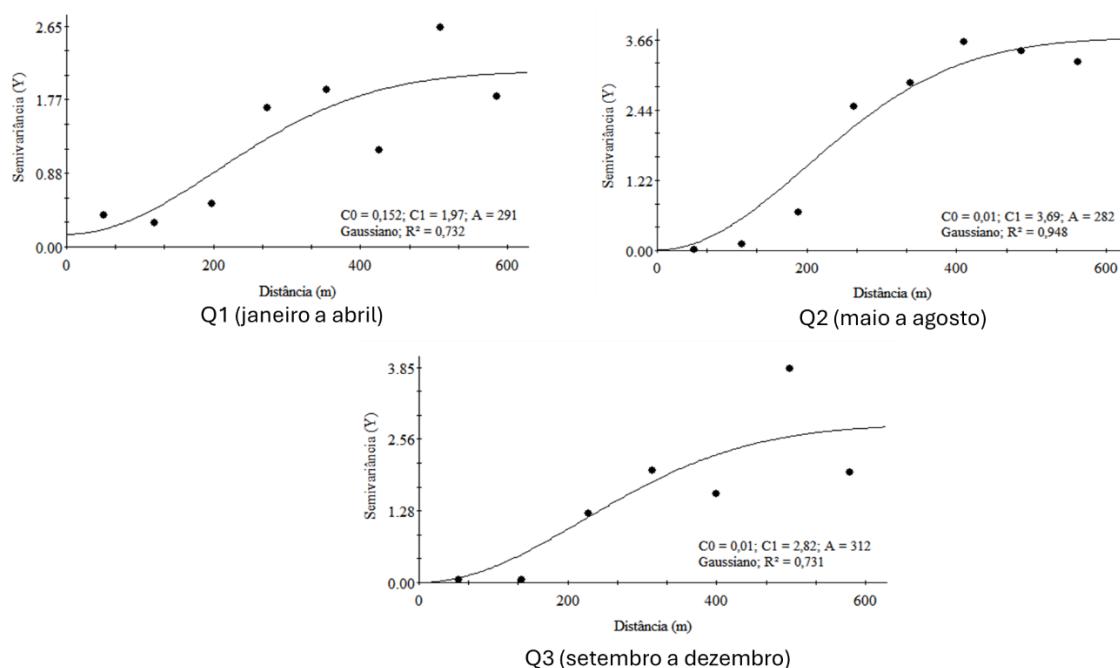
Os semivariogramas (Figura 12 e 13) foram ajustados aos modelos esférico (Q3 – 2019), gaussianos (Q1 a Q3 de 2023) e exponenciais (Q1 e Q2 de 2019) e foram validados pelo critério de Leave-one-out. Em 2019, os desvios padrão foram próximos a um (1,12; 1,23; 1,16) e os erros médios próximos a zero (0,03; -0,12; 0,06). No ano de 2023, os desvios padrão mantiveram-se próximos a um (1,07; 1,12; 0,94) e os erros médios próximos a zero (0,03; 0,07; -0,02).

Figura 12 - Semivariogramas experimentais e modelos teóricos ajustados para dados quadrimestrais de salinidade (CE) para o ano de 2019.



Fonte: o autor (2024).

Figura 13 - Semivariogramas experimentais e modelos teóricos ajustados para dados quadrimestrais de salinidade (CE) para o ano de 2023.

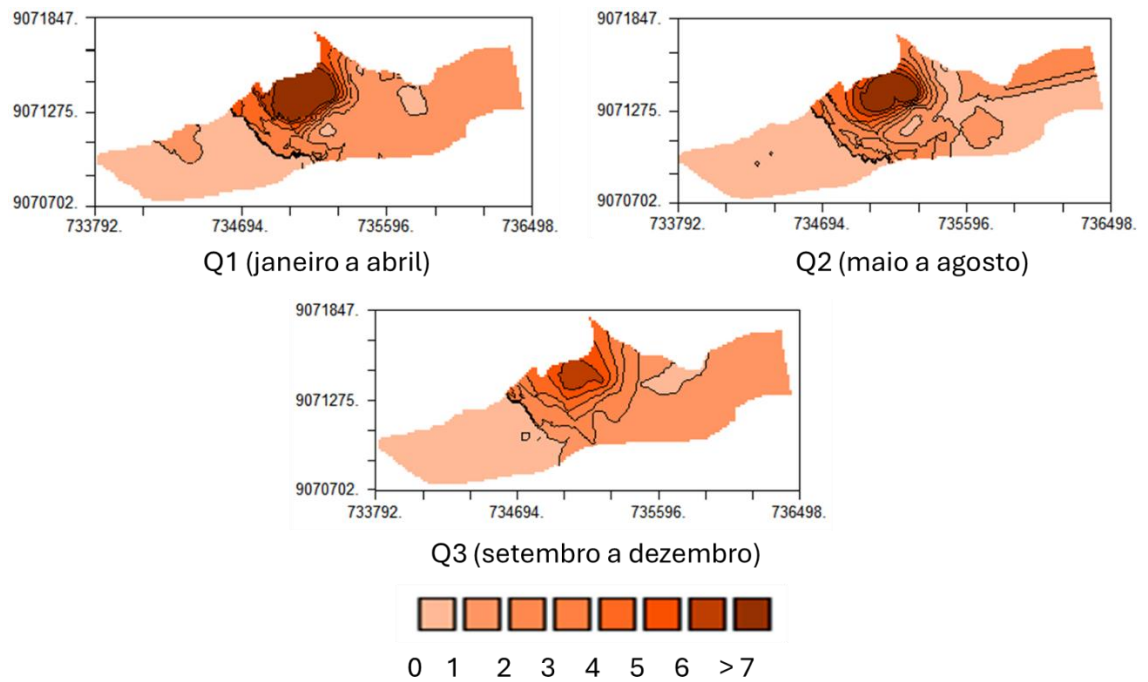


Fonte: o autor (2024).

Os semivariogramas ajustados indicam uma dependência espacial variando de forte a moderada com variação entre 128 e 180 metros para o ano de 2019 e de 282 e 312 metros para o ano de 2023, semelhante aos achados por Andrade *et al.* (2012) quando investigaram a dinâmica especial da condutividade elétrica para o mesmo vale aluvial do presente estudo.

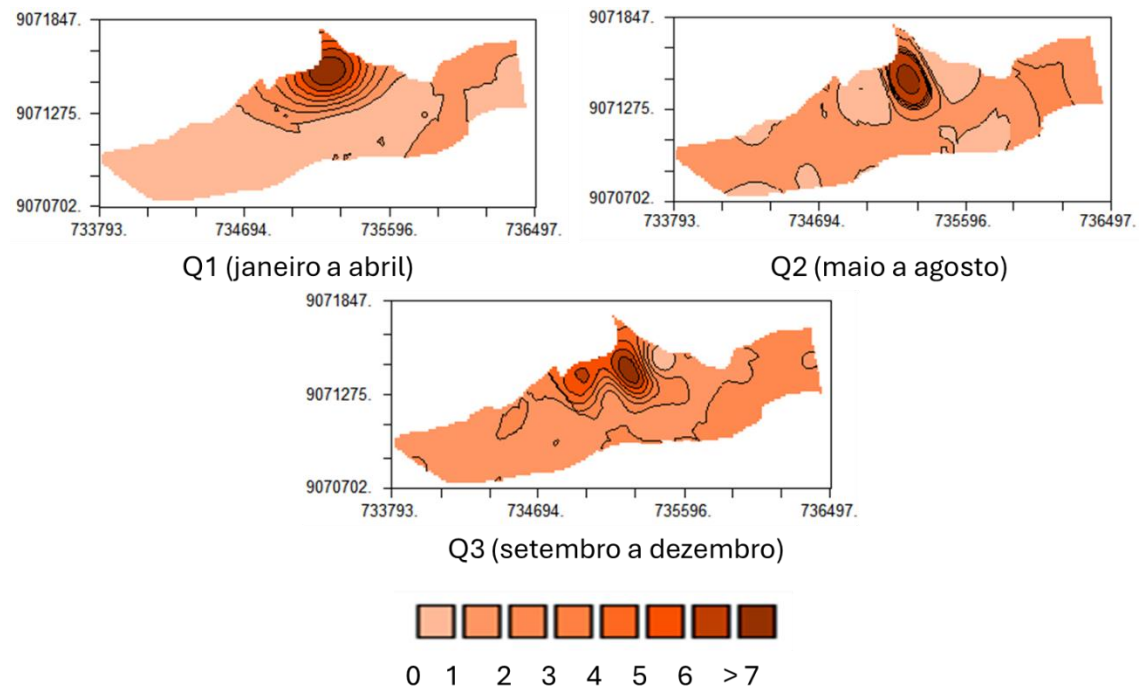
Os modelos ajustados foram utilizados na elaboração de mapas de isolinhas representando a condutividade elétrica, por meio da aplicação da técnica de krigagem as Figuras 14 e 15 mostram os mapas para os quadrimestres referentes aos anos de 2019 e 2023, respectivamente.

Figura 14 - Mapas de krigagem da CE (dS/m) para os quadrimestres do ano de 2019.



Fonte: o autor (2024).

Figura 15 - Mapas de krigagem da CE (dS/m) para os quadrimestres do ano de 2023.



Fonte: o autor (2024).

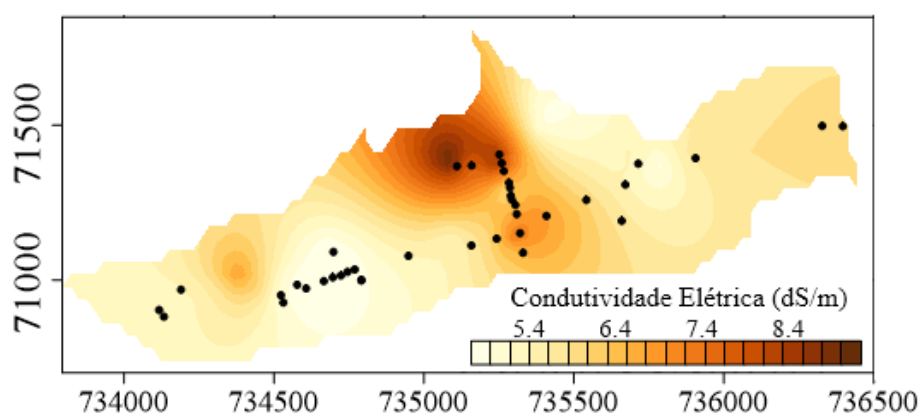
Os mapas de isolinhas da CE revelam que as regiões de maior CE estão situadas na parte central do vale, em linha com os estudos de Andrade *et al.*

(2012) e Montenegro *et al.* (2003), que apontam para uma maior influência do fluxo subterrâneo e do escoamento das encostas na concentração de sais nesta área. As variações na CE ao longo do ano refletem a influência da precipitação, da evapotranspiração e das extrações de água.

Áreas com condutividade elétrica abaixo de 4 dS/m mostraram variações significativas devido à influência das chuvas, enquanto locais com valores acima desse limite mantiveram-se estáveis, com concentrações elevadas constantes, como apontado por Almeida *et al.* (2024).

Na Figura 16, adaptada de Almeida *et al.* (2024), tem-se a condutividade elétrica média no Vale do Mimoso ao longo dos anos de 2000 a 2019. Os mapas gerados durante o período de monitoramento deste estudo demonstram semelhanças significativas com os padrões observados por Almeida *et al.* (2024). Em ambos os casos, é possível identificar uma maior concentração de condutividade elétrica na região central do vale, atribuída a condição de solo siltoso e com baixa condutividade hidráulica.

Figura 16. Condutividade elétrica média anual do Vale do Mimoso.



Fonte: Adaptada de Almeida *et al.* (2024)

Com base nas análises das Figuras 14 e 15, identifica-se um padrão de variação na CE ao longo dos quadrimestres no Vale. Inicialmente, nota-se uma diminuição da condutividade elétrica do primeiro para o segundo quadrimestre, seguido por um aumento do segundo para o terceiro quadrimestre. Esta sequência de variações sugere uma dinâmica influenciada por fatores externos.

A dinâmica observada está coerente com os ciclos sazonais de precipitação, marcados pela transição do período seco para o chuvoso entre o

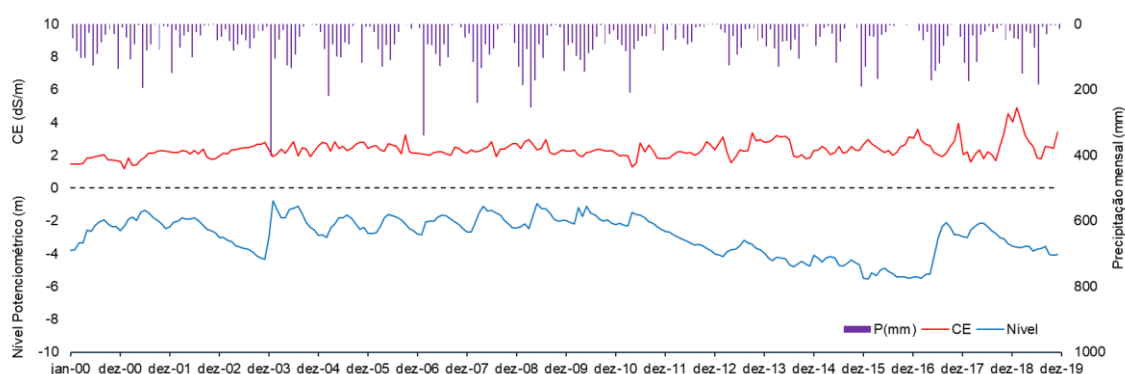
primeiro e o segundo quadrimestre, e pela mudança do chuvoso para o seco entre o segundo e o terceiro quadrimestre, além das extrações de água para atividades agrícolas. Além disso, observa-se que a maior CE se concentra na região central do vale.

A CE é um indicador crucial da qualidade da água para fins de irrigação. Segundo Ayers e Westcot (1989), a CE é classificada em faixas que variam de excelente a inadequada para irrigação, dependendo do seu valor em dS/m a 25 °C. Essas faixas ajudam a determinar a adequação da água para diferentes tipos de culturas e condições de solo, enfatizando a importância de práticas de manejo adequadas para mitigar os efeitos da salinidade, especialmente em águas com CE superior a 3,0 dS/m.

Os resultados obtidos através dos mapas de krigagem indicam que as áreas apresentando as faixas mais adequadas para irrigação baseada na CE estão localizadas nas partes oeste e leste da área de estudo. No entanto, existem algumas exceções em pontos específicos onde a agricultura e as explorações são realizadas de forma mais intensa, o que sugere um impacto significativo das práticas agrícolas na qualidade da água de irrigação. Essa observação está alinhada com as análises realizadas por Andrade *et al.* (2012).

Na Figura 17 observa-se uma visão abrangente das variações no nível potenciométrico e na condutividade elétrica do vale ao longo de duas décadas, de janeiro de 2000 a dezembro de 2019, correlacionando essas flutuações com os dados de precipitação no mesmo período.

Figura 17- Flutuações de nível potenciométrico e condutividade elétrica, de janeiro de 2000 a dezembro de 2019.

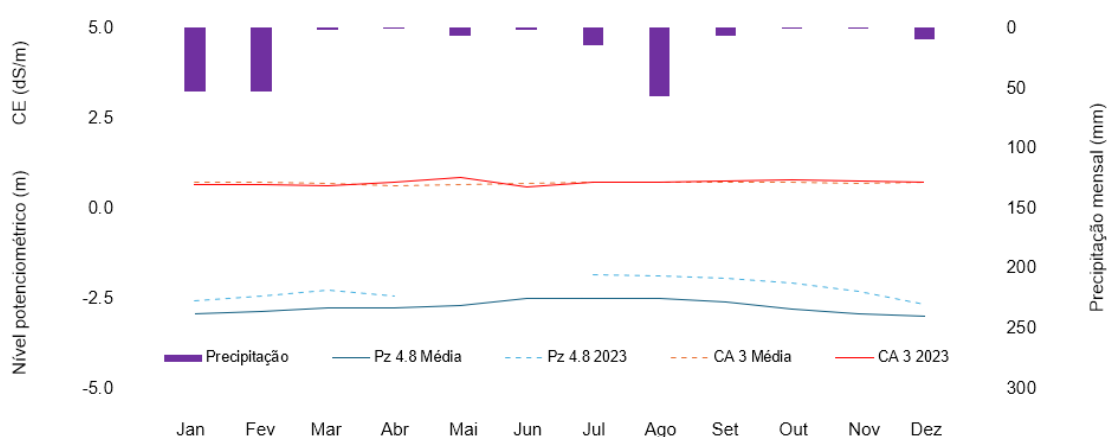


Fonte: o autor (2024).

A Figura 15 mostra as tendências temporais da CE e do nível potenciométrico, além de destacar a influência da precipitação sobre esses parâmetros. Observa-se que, durante períodos de diminuição do nível potenciométrico, a CE geralmente aumenta, e que quando o nível volta a subir a CE tende a diminuir. Isso sugere uma interação significativa com os processos de recarga e extração do aquífero, seja devido à precipitação ou às práticas de agricultura irrigada.

Na Figura 18 tem-se uma análise de dois pontos estáveis para a região conforme apresentado por Almeida *et al.* (2024), onde o ponto Pz 4.8 é representativo para o nível potenciométrico e o ponto CA 3 para a CE, percebe-se que o comportamento no ano de 2023 é similar a média histórica, observando que não foi feita coleta nos meses de maio e junho de 2023 para o ponto Pz 4.8.

Figura 18 – Gráfico da média histórica (2000-2019) do nível (Pz 4.8) e condutividade elétrica (CA 3) para os pontos estáveis em comparação com o ano de 2023.

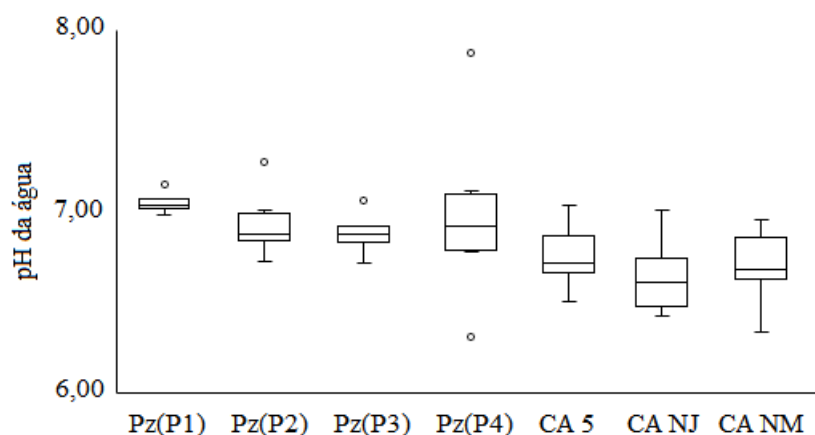


Fonte: o autor (2024).

3.4 Análise do pH no vale aluvial de maio a dezembro de 2023

Neste estudo, foram selecionados sete poços de monitoramento ao longo do vale, levando em consideração sua localização estratégica e a recorrência no uso da água para irrigação dos lotes agrícolas. Esses poços foram escolhidos com o objetivo de avaliar a qualidade da água subterrânea utilizada na agricultura da região. Na Figura 19 tem-se os box-plots do pH para cada um dos sete poços ativos com irrigação.

Figura 19 – Box-plots do pH para os pontos analisados para o período de maio a dezembro de 2023.

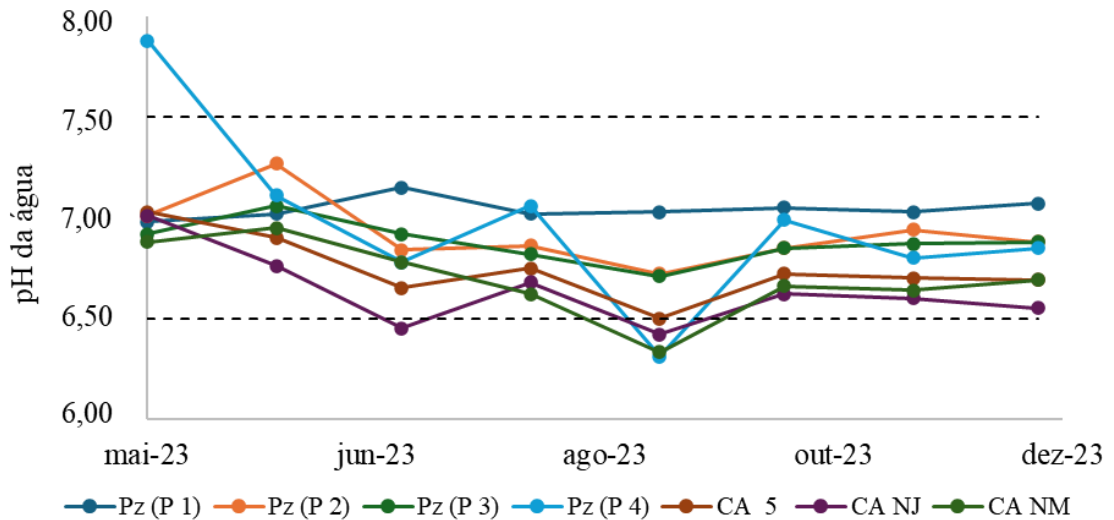


Fonte: o autor (2024).

A mediana do pH varia entre os pontos de coleta, com o Pz (P 4) apresentando uma mediana de 6,99 e o CA NM uma mediana de 6,89. Esses dois poços também exibem uma maior amplitude nos valores de pH ao longo dos oito meses, com o Pz (P 4) variando de 6,41 a 7,88 e o CA NM variando de 6,33 a 6,95, indicando uma maior variabilidade em comparação com os demais pontos, em contraste, o Pz (P 1) demonstrou uma menor variação nos valores de pH, oscilando apenas entre 6,98 e 7,15, indicando uma estabilidade maior em comparação com os outros pontos analisados. A variabilidade pode estar associada a diversos fatores, como características geológicas locais, influência de atividades antrópicas próximas aos poços ou variações sazonais que afetam a química da água subterrânea (Berendrecht *et al.*, 2023).

Na Figura 20 observa-se os gráficos de linha temporal do pH para cada ponto ao longo do período estudado.

Figura 20 - Gráficos de linha temporal do pH para os pontos monitorados.



Fonte: o autor (2024).

Os gráficos de linha revelam flutuações temporais do pH em cada ponto. Alguns pontos apresentam uma flutuação de aumento ou diminuição do pH ao longo do tempo, enquanto outros mostram flutuações sazonais ou eventos específicos que afetam o pH.

A combinação de box-plots e gráficos de linha temporal permite uma análise abrangente do comportamento do pH nos 7 pontos selecionados. Nota-se a presença de outliers em alguns pontos, como o valor de 7,88 no Pz (P 4) em maio de 2023 e o valor de 7,20 no CA 5 em junho de 2023. Esses valores mais elevados de pH merecem uma investigação adicional para compreender suas causas e possíveis implicações na qualidade da água subterrânea. Conforme os critérios ressaltados por Gudla *et al.* (2023), a faixa de pH entre 6,5 e 8,5 é considerada ideal pois favorecem a disponibilidade e a absorção de nutrientes essenciais pelas plantas, como nitrogênio, fósforo e micronutrientes, tornando a área, de maneira geral, adequada para agricultura com base no pH encontrado na água subterrânea no vale aluvial.

Ademais, a presença de outliers podem indicar eventos pontuais, como a influência de fontes de contaminação próximas ao poço, ou anomalias hidrogeoquímicas que requerem atenção especial (Berendrecht *et al.*, 2023). A significativa oscilação do pH observada em Pz (P 4), pode ser atribuída às práticas agrícolas, como a aplicação sazonal de fertilizantes nitrogenados e corretivos de solo, que alteram a acidez do solo e, consequentemente a água

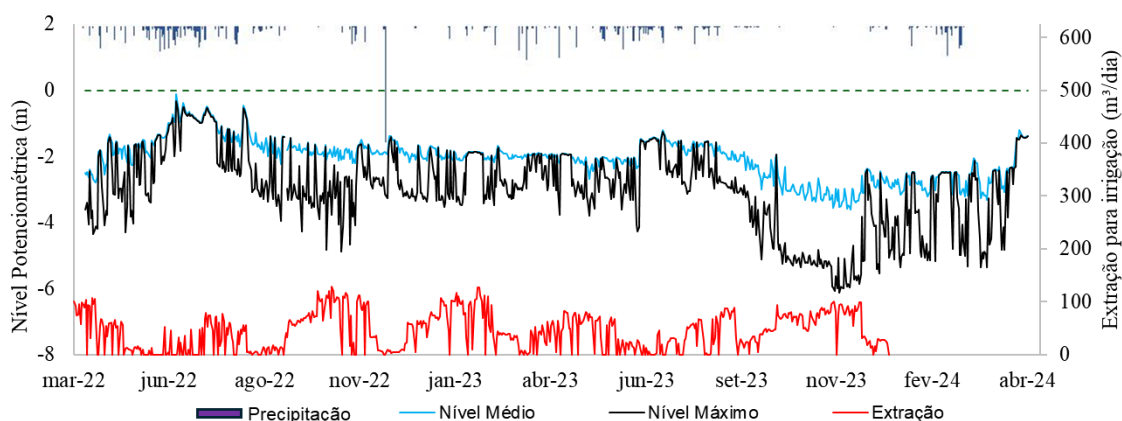
subterrânea. Essas variações também podem ser influenciadas pela irrigação e pela lixiviação de nutrientes, provocadas pela precipitação pluviométrica.

3.5 Avaliação da recarga e rebaixamento do aquífero no poço monitorado

O monitoramento contínuo do nível d'água em aquíferos é essencial para compreender a dinâmica dos recursos hídricos subterrâneos e subsidiar a gestão sustentável desses recursos. Neste estudo, foram coletados dados de nível d'água no poço P4, utilizando um sensor da Ampeq, com registros a cada 15 minutos, durante o período de março de 2022 a abril de 2024. Além disso, foram obtidos dados de precipitação diária e estimativas de extração de água para irrigação com base no histórico da área entre junho e dezembro de 2023.

Na Figura 21 observa-se a variação do nível d'água no poço P4 ao longo do período monitorado, juntamente com os dados de precipitação diária e as estimativas de extração de água para irrigação.

Figura 21 - Variação da cota potenciométrica, precipitação e extração de água para irrigação, no poço sentinela P4.



Fonte: o autor (2024).

Durante o período de monitoramento realizado entre junho e dezembro de 2023, foram coletadas informações diretamente com os agricultores locais para estimar os volumes de água extraídos do poço P4 destinados à irrigação.

Observa-se que há uma relação entre a extração de água para irrigação e o rebaixamento do nível d'água no aquífero. Durante os períodos de menor precipitação, especialmente a partir de setembro de 2023, nota-se um declínio no nível d'água, indicando uma maior taxa de rebaixamento do aquífero.

enquanto a extração de água para irrigação aumenta. Outro fator importante de ressaltar é que praticamente não houve precipitação nesse período, o que corrobora a maior necessidade de água extraída e o rebaixamento do nível potenciométrico no poço analisado.

Por outro lado, os eventos de precipitação parecem contribuir para a recarga ou manutenção do aquífero, com uma elevação do nível potenciométrico entre março e julho de 2022, e pouca variação na cota potenciométrica média de novembro de 2022 até setembro de 2023. No entanto, a resposta do aquífero à precipitação é menos imediata em comparação com o efeito da extração de água para irrigação. Isso pode ser atribuído à capacidade de armazenamento do aquífero e ao tempo necessário para que a água da chuva se infiltre e alcance a zona saturada (Fetter, 2001).

Além da extração de água para irrigação e da precipitação, a evapotranspiração também desempenha um papel importante na dinâmica do aquífero. A evapotranspiração representa a perda de água para a atmosfera através da evaporação do solo e da transpiração das plantas (Allen *et al.*, 1998). Durante os meses de verão, quando as temperaturas são mais elevadas e a demanda evaporativa é maior, a evapotranspiração pode contribuir para o rebaixamento do nível d'água no aquífero, o que coincide com o período de setembro a dezembro no período analisado.

Os resultados obtidos neste estudo evidenciam a influência significativa da extração de água para irrigação no rebaixamento do aquífero, destacando a importância de uma gestão adequada dos recursos hídricos subterrâneos. O rebaixamento excessivo do nível d'água pode levar a impactos negativos, como a redução da disponibilidade hídrica e aumento dos custos de (Custodio; Llamas, 1983).

Para promover a sustentabilidade do aquífero e garantir a disponibilidade de água a longo prazo, é necessário adotar medidas de gestão que considerem a recarga natural do aquífero e a demanda por água para diferentes fins. Algumas estratégias podem incluir o monitoramento contínuo do nível d'água, o controle da extração de água subterrânea, a promoção de práticas de irrigação eficientes e a implementação de políticas de conservação e uso racional da água (Foster; Chilton, 2003).

4 Conclusões

1. A análise da variabilidade do CRD e da precipitação revelou uma relação inversa entre o CRD e o nível potenciométrico, influenciada pela variabilidade da precipitação e de eventos climáticos extremos, como El Niño e La Niña, que apresentaram padrões distintos de precipitação na região.
2. A variação espacial e temporal do nível potenciométrico em 2023, utilizando semivariogramas e mapas de krigagem, revelou a presença de dependência espacial influenciada por fatores locais, como a heterogeneidade do aquífero e a distribuição das áreas de recarga e descarga, evidenciando uma variação significativa do nível potenciométrico ao longo do ano.
3. A análise da distribuição espacial e temporal da CE no ano de 2023, revelou uma dependência espacial variando de forte a moderada, com as regiões de maior CE situadas na parte central do vale. As áreas mais adequadas para irrigação baseada na CE estão localizadas nas partes oeste e leste.
4. A análise do pH revelou que, de maneira geral, os valores de pH se mantiveram dentro da faixa ideal de 6,5 a 8,5. Apesar de algumas variações pontuais e da presença de outliers, que merecem investigação adicional para compreender suas causas.
5. O monitoramento contínuo do nível d'água no poço Pz P4, juntamente com dados de precipitação e estimativas de extração de água para irrigação, evidenciou a influência da menor precipitação no rebaixamento do aquífero.

Referências

- ALBUQUERQUE, C. G. de; MONTENEGRO, S. M. G. L.; MONTENEGRO, A. A. de A.; FONTES JÚNIOR, R. V. de P. Recarga de aquífero aluvial sob uso agrícola. **Revista Águas Subterrâneas**, v. 29, n. 1, 2015.
- ALCÂNTARA, L. R. P. de; BISERRA, J. L. A.; COSTA, L. F.; ALVES, A. T. A.; NOVA, A. A. V.; SANTOS NETO, S. M. dos; COUTINHO, A. P.; ANTONINO, A. C. D. Pluviometria espaço-temporal da bacia hidrográfica do una. **Geociências**, v. 39, n. 3, p. 14266, 2020.
- ALMEIDA, T. A. B. Avaliação experimental e numérica da adequação e disponibilidade de águas subterrâneas aluviais e de reuso para fins agrícolas no semiárido. 2020. **Dissertação (Mestrado)** - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2020.
- ALMEIDA, T. A. B.; MONTENEGRO, A. A. A.; MACKAY, R.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; COELHO, V. H. R.; DE CARVALHO, A. A.; DA SILVA, T. G. F. Hydrogeological trends in an alluvial valley in the Brazilian semiarid: Impacts of observed climate variables change and exploitation on groundwater availability and salinity. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 53, p. 101784, 2024.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop Evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, **Rome**, v. 300, n. 9, p. D05109, 1998.
- ANDRADE, A. R. S.; NETO, A. H. G., CRUZ, A. F. S.; ANDRADE, E. K. P.; SANTOS, V. F.; SILVA, T. N. P. Geoestatística aplicada à variabilidade espacial e padrões nas séries temporais da precipitação no Agreste pernambucano. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, Pernambuco, Brazil, v. 3, n. 1, p. 126-145, 2018.

ANDRADE, T. S.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; MONTENEGRO, A. A. A.; RODRIGUES, D. F. B. Variabilidade espaço-temporal da condutividade elétrica da água subterrânea na região semiárida de Pernambuco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 5, 2012.

AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. A qualidade de água na agricultura. 29 ed. Traduzido por: H. R. GHEYI, J. F. MEDEIROS e F. A.V. DAMASCO. Campina Grande: UFPB, 1999.

BARROS, E. N.; CABRAL, J. J. S. P.; PALECHOR, E. U. L.; TAVARES, P. R. L.; MENEZES, L. A. A.; SILVA JUNIOR, M. A. B. Jardins de chuva para mitigação dos alagamentos urbanos: análise de um projeto piloto. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 17, n. 2, p. 1396-1411, 2024.

BARNSTON, A. G.; GLANTZ, M. H.; HE, Y. Predictive Skill of Statistical and Dynamical Climate Models in SST Forecasts during the 1997–98 El Niño Episode and the 1998 La Niña Onset. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 80, n. 2, p. 217-244, 1999.

BREDENKAMP, D. B.; BOTHA, L. J.; VAN TONDER, G. J.; VAN RENSBURG, H. J. Manual on Quantitative Estimation of Groundwater Recharge and Aquifer Storativity. **Water Research Commission**, Pretoria, 1995.

BERENDRECHT, W.; VAN VLIET, M.; GRIFFIOEN, J. Combining statistical methods for detecting potential outliers in groundwater quality time series. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 195, p. 85, 2023.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KORNOPKA, A. E. Field scale variability of soils properties in central Iowa Soils. **Soil Science Society American Journal**, v.58, p.1501-1511, 1994.

CASTRO, F. C.; SANTOS, A. M. Salinity of the Soil and the Risk of Desertification in the Semiarid Region. **Mercator**, Fortaleza, v. 19, 2019.

CHILÈS, J. P.; DELFINER, P. Geostatistics: Modeling spatial uncertainty. 2. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2012.

CUI, W.; DONG, X.; XI, B.; KENNEDY, A. Evaluation of reanalyzed precipitation variability and trends using the gridded gauge-based analysis over the CONUS. **Journal of Hydrometeorology**, v. 18, n. 8, p. 1-15, 2017.

CUSTODIO, E.; LLAMAS, M. R. Hidrología subterránea. 2. ed. Barcelona: **Omega**, 1983.

FAO. The State of Food and Agriculture 2022: Leveraging automation in agriculture for transforming agrifood systems. **Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations**, 2022.

FETTER, C. W. Applied Hydrogeology. 4. ed. Prentice Hall, **Upper Saddle River**, 2001.

FLETCHER, R. J.; FORTIN, M. J. Spatial Dependence and Autocorrelation. In: Spatial Ecology. **Springer**, Cham, p. 117-150, 2018.

FOSTER, S.; CHILTON, J. Groundwater: the processes and global significance of aquifer degradation. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: **Biological Sciences**, v. 358, n. 1440, p. 1957-1972, 2003.

GLANTZ, M. H.; RAMIREZ, I. J. Reviewing the Oceanic Niño Index (ONI) to Enhance Societal Readiness for El Niño's Impacts. **International Journal of Disaster Risk Science**, v. 11, p. 394-403, 2020.

GOMES, D. J.; LIMA, A. M.; SILVA JÚNIOR, J. D.; SERRÃO, E. A. Impactos das Mudanças de Uso da Terra e dos Eventos Climáticos Extremos em Sistemas Hidrológicos da Amazônia Oriental - Bacia do Rio Capim (PA-MA). **Revista Geográfica Acadêmica**, v. 12, p. 153-172, 2018.

GRIMM, A. M. The El Niño impact on the summer monsoon in Brazil: regional processes versus remote influences. **Journal of Climate**, v. 16, n. 2, p. 263-280, 2003.

GUDLA, S. L.; DEVARAKONDA, N.; RAY, S.; VARIKUPPALA, M. Evaluating the Primary Macronutrients and their Correlations with pH, Electrical conductivity, Organic Carbon and Soil Nutrient index in the Arid and Semi-Arid Climatic Zones of Anantapur District, Andhra Pradesh, India. **International Journal of Plant & Soil Science**, v. 35, n. 20, p. 490-497, 2023.

HOAGLIN, D. C.; MOSTELLER, F.; TUKEY, J. W. Análise exploratória de dados: Técnicas robustas. Lisboa: Edições **Salamandra**, 446p, 1992.

IPCC. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. **Cambridge University Press**, 2022.

KAYANO, M. T.; ANDREOLI, R. V. Relations of South American summer rainfall interannual variations with the Pacific Decadal Oscillation. **International Journal of Climatology**, v. 27, n. 4, p. 531-540, 2007.

MATHERON, G. Principles of geostatistics. **Economic Geology**, v. 58, n. 8, p. 1246-1266, 1963.

MCPHADEN, M. J.; ZEBIAK, S. E.; GLANTZ, M. H. ENSO as an integrating concept in earth science. **Science**, v. 314, n. 5806, p. 1740-1745, 2006.

MILÀ, C.; MATEU, J.; PEBESMA, E. J.; MEYER, H. Nearest neighbour distance matching Leave-One-Out Cross-Validation for map validation. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 13, p. 1304-1316, 2022.

MONTENEGRO, A. A. A. Stochastic Hydrologeological modelling of aquifer salinization from small scale agriculture in Northeast Brazil. University of Newcastle, 272p. **PhD Thesis**, 1997.

MONTENEGRO, A. A. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Variabilidade espacial de classes de textura, salinidade e condutividade hidráulica de solos em planície aluvial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 1, p. 30-37, 2006.

MONTENEGRO, S. M. G. L.; MONTENEGRO, A. A. A.; MACKAY, R.; OLIVEIRA, A. S. C. Dinâmica hidráulica de um aquífero aluvial no semi-árido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 2, p. 27-38, 2003.

MORAIS, L. S.; CHAGAS, I. C.; SILVA, D. P.; SCALIZE, P. S. Qualidade da água superficial em comunidades rurais do estado de Goiás durante a estação seca e sua relação com o uso e a ocupação do solo. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, 2023.

MSIMBIRA, L. A.; SMITH, D. L. The Roles of Plant Growth Promoting Microbes in Enhancing Plant Tolerance to Acidity and Alkalinity Stresses. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 4, p. 106, 2020.

OECD. OECD Environmental Outlook to 2050: The Consequences of Inaction. Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development, 2022.

PANG, Y.; WANG, Y.; LAI, X.; ZHANG, S.; LIANG, P.; SONG, X. Enhanced Kriging leave-one-out cross-validation in improving model estimation and optimization. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, 2023.

PARK, J.; SUNG, M.; YANG, Y.; ZHAO, J.; AN, S.; KUG, J. Role of the climatological intertropical convergence zone in the seasonal footprinting mechanism of the El Niño-Southern Oscillation. **Journal of Climate**, p. 1-43, 2021.

RAO, V. B.; FRANCHITO, S. H.; SANTO, C. M. E.; GAN, M. A. An update on the rainfall characteristics of Brazil: seasonal variations and trends in 1979-2011. **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 1, p. 291-302, 2016.

SILVA, T. R. B. F.; SANTOS, C. A. C.; SILVA, D. J. F.; SANTOS, C. A. G.; SILVA, R. M.; BRITO, J. I. B. Climate Indices-Based Analysis of Rainfall Spatiotemporal Variability in Pernambuco State, Brazil. **Water**, v. 14, n. 14, p. 2190, 2022.

SILVA, V. P. R.; PEREIRA, E. R. R.; ALMEIDA, R. S. R. Estudo da variabilidade anual e intra-anual da precipitação na região Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 27, n. 2, p. 163-172, 2012.

SOUZA, A. M.; SANTOS, I. I.; OLIVEIRA, L. L. A relação da chuva com a recarga de água em uma nascente urbana em Santarém-PA, Amazônia, Brasil. **Nature and Conservation**, v. 14, n. 3, 2021.

UNESCO. The United Nations World Water Development Report 2022, Groundwater: Making the invisible visible. Paris: **UNESCO**, 2022.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (ed.). Applications of Soil Physics. **New York: Academic**, Cap. 2, p. 319-344, 1980.

WEBER, K. A.; STEWART, M. T. A critical analysis of the cumulative rainfall departure concept. **Ground Water**, v. 42, n. 1, p. 1-7, 2004.

WEBSTER, R.; OLIVER, M. A. Geostatistics for environmental scientists. 2. ed. Chichester: **John Wiley & Sons**, 2007.

WWAP. The United Nations World Water Development Report 2022: Groundwater: Making the invisible visible. UNESCO World Water Assessment Programme. Paris: **UNESCO**, 2022.

XU, Y.; TONDER, G. V. Estimation of recharge using a revised CRD method.
Water SA, v. 27, p. 341-343, 2001.

CAPÍTULO III - Estimativa de evapotranspiração utilizando sensores de baixo custo

Resumo

Utilizou-se e avaliou-se um protótipo de baixo custo utilizando a plataforma Arduino para monitoramento de temperatura e umidade relativa do ar, comparando sua capacidade com uma estação de referência *Campbell Scientific*. Três campanhas de monitoramento foram conduzidas, e a avaliação da confiabilidade dos dados foi realizada por meio de análises estatísticas, incluindo o coeficiente de correlação de Pearson, gráficos de dispersão, análise de Bland-Altman e raiz do erro quadrático médio (RMSE). Nas Campanhas 1 e 2, os resultados mostraram uma forte correlação linear positiva, com alto coeficiente de determinação (R^2) e baixo RMSE, indicando alta precisão. A análise de Bland-Altman revelou boa concordância dos dados. Na Campanha 3, a análise da temperatura revelou uma forte correlação linear negativa e um alto coeficiente de determinação, o RMSE foi maior em comparação com as campanhas anteriores, sugerindo menor precisão. Para a umidade relativa, os resultados continuaram a mostrar forte correlação linear positiva, altos coeficientes de determinação e baixos RMSEs. Também foi realizada uma análise comparativa dos métodos alternativos para estimativa da evapotranspiração, utilizando como referência os dados da estação da *Campbell Scientific*. Os métodos analisados incluíram FAO Penman-Monteith, Hargreaves-Samani e Romanenko. Os resultados indicaram que o método de Romanenko ajustado apresentou uma boa correlação com os métodos de Penman-Monteith para a região, ligeiramente melhores que o método de Hargreaves-Samani, tornando-se uma alternativa viável para a estimativa da evapotranspiração local.

Palavras-chave: Monitoramento de Baixo Custo, Estimativa da Evapotranspiração, Avaliação Instrumental.

1 Introdução

A medição precisa de variáveis meteorológicas e climáticas é fundamental para garantir uma irrigação adequada e a segurança hídrica em zonas com pouca disponibilidade de água (Gaznayee *et al.*, 2023). De acordo com um estudo realizado por (Chakraborty *et al.*, 2013), a estimativa da evapotranspiração é essencial para o manejo agrícola, sendo um dos pontos importantes na gestão hídrica e no uso da água para fins agrícolas.

No entanto, o custo do monitoramento pode ser proibitivamente alto, especialmente para pequenos agricultores (Costa, 2024). A aquisição e manutenção de estações meteorológicas tradicionais, como as oferecidas pela *Campbell Scientific*, uma empresa conhecida por seus produtos robustos e consolidados no mercado, podem ser economicamente inviáveis para muitos usuários.

Diante dessa realidade, torna-se necessário o desenvolvimento de alternativas mais acessíveis para a medição de variáveis meteorológicas e climáticas, a fim de democratizar o acesso a essas informações e promover um manejo agrícola mais eficiente e sustentável (Silva *et al.*, 2024). Para abordar essa necessidade, estudos recentes têm explorado outras opções de instrumentação de baixo custo para o monitoramento de variáveis meteorológicas e climáticas, bem como para a medição do nível do lençol freático (Espinoza Ortiz *et al.*, 2023; Barzegar *et al.*, 2023; Arinaitwe; Okedi, 2024).

O desenvolvimento de um protótipo utilizando a plataforma Arduino apresenta-se como uma solução acessível e eficiente para o monitoramento e estimativa da evapotranspiração na região semiárida do Nordeste brasileiro. A fim de avaliar a confiabilidade e a acurácia desse sistema, torna-se fundamental a realização de um estudo comparativo entre os dados obtidos pelo protótipo e aqueles medidos por uma estação de referência, como a da *Campbell Scientific*. Essa análise permitirá validar a precisão dos diferentes métodos de cálculo da evapotranspiração empregados no protótipo, bem como identificar possíveis limitações e oportunidades de aprimoramento da solução proposta (Allen *et al.*, 1998; Velasco-Muñoz, 2019).

A medição precisa de evapotranspiração é necessária para garantir uma irrigação adequada e a segurança hídrica em zonas com pouca disponibilidade

de água (Kiraga *et al.*, 2024). Com os dados estação da *Campbell Scientific* utilizou-se o método FAO Penman-Monteith e o método de Hargreaves-Samani para calcular a evapotranspiração, enquanto com os dados do protótipo Arduino estimou-se através do método de Romanenko.

2 Material e métodos

2.1 Descrição dos sistemas de monitoramento

Para avaliar o desempenho e a confiabilidade de sistemas de monitoramento meteorológico de diferentes faixas de custo, este estudo utilizou duas configurações distintas: uma estação de referência da *Campbell Scientific* e um protótipo desenvolvido em Arduino.

A estação da *Campbell Scientific*, reconhecida internacionalmente por sua alta precisão e confiabilidade, foi selecionada como referência para comparação com os sistemas de baixo custo. Essa estação é equipada com sensores de alta qualidade e possui um datalogger robusto para registro e armazenamento dos dados de radiação líquida média (W/m^2), radiação global média (W/m^2), temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$), umidade relativa do ar (%), velocidade média do vento (m/s), direção do vento ($^{\circ}$) e precipitação total (mm) no intervalo de 10 minutos. A *Campbell Scientific* é amplamente utilizada em pesquisas científicas e aplicações que exigem medições precisas e confiáveis.

O protótipo em Arduino foi desenvolvido como uma alternativa de baixo custo personalizada. Esse sistema utiliza componentes acessíveis e de fácil aquisição, como o sensor de temperatura e umidade relativa do ar DHT22, conhecido por sua relação custo-benefício favorável (ADAFRUIT, 2023). Um módulo de relógio em tempo real (RTC) foi incorporado ao protótipo para garantir o registro preciso do tempo, enquanto um módulo de cartão micro SD foi utilizado para armazenamento local dos dados. O protótipo foi acondicionado em um abrigo meteorológico adequado, o que visa proteger os componentes eletrônicos contra intempéries e garantir medições precisas (Tarara; Hoheisel, 2007).

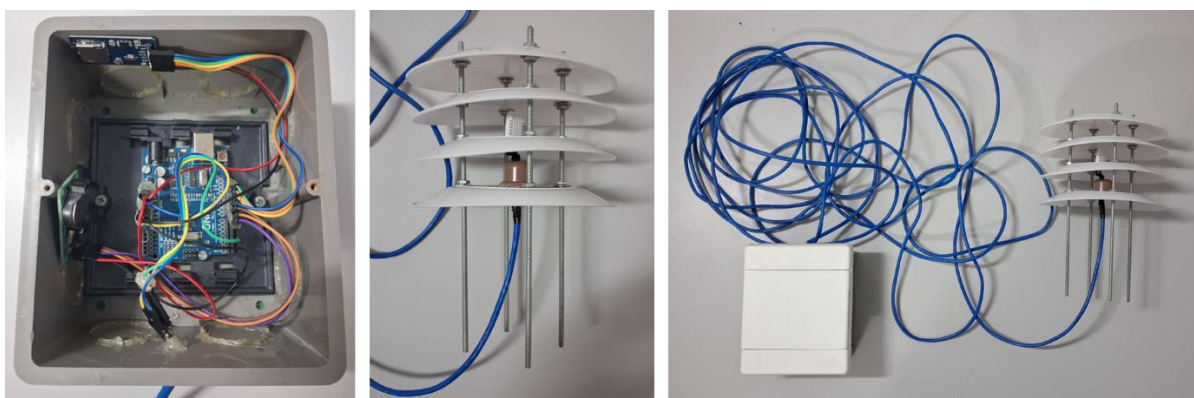
A seleção desses dois sistemas de monitoramento permitiu uma comparação abrangente entre uma estação de referência de alto custo e um protótipo personalizado utilizando componentes acessíveis. Essa abordagem visa avaliar o desempenho e a confiabilidade de diferentes opções de monitoramento meteorológico, considerando suas respectivas faixas de custo e

características técnicas. Os resultados desta análise podem fornecer informações valiosas sobre a viabilidade e a adequação de sistemas de baixo custo para aplicações específicas, contribuindo para a democratização do monitoramento meteorológico e a expansão de sua utilização em diversos contextos de pesquisa e aplicação.

2.1 Elaboração e configuração do Protótipo

O protótipo desenvolvido em Arduino foi uma solução de baixo custo personalizada, tendo como objetivo avaliar sua capacidade em relação a alternativas do mercado. Esse sistema utiliza a plataforma Arduino, conhecida por sua flexibilidade e facilidade de programação (Arduino, 2023). O protótipo é composto por diversos componentes, incluindo o sensor de temperatura e umidade DHT22, um módulo de relógio em tempo real (RTC) DS1302 e um módulo de cartão micro SD para armazenamento local dos dados. Além desses componentes principais, foram utilizados cabos conectores e uma caixa de acrílico para proteção dos componentes eletrônicos Figura 1.

Figura 1 – Protótipo do Arduino desenvolvido para a medição de temperatura do ar e umidade relativa do ar.



Fonte: o autor (2024).

A montagem do sistema foi realizada de forma a garantir a integridade dos componentes e a facilidade de manutenção. O Arduino, juntamente com o módulo RTC e o módulo micro SD, foram acomodados dentro de uma caixa de acrílico, proporcionando proteção contra poeira, chuva, danos físicos e outros problemas. A conexão entre o sensor DHT22 e o Arduino foi estabelecida utilizando um cabo de rede RJ45, aproveitando sua flexibilidade e durabilidade.

Esse cabo permite que o sensor seja posicionado a uma distância adequada do Arduino, minimizando a influência do calor gerado pelos componentes eletrônicos nas leituras de temperatura e umidade.

Para assegurar a integridade do sensor DHT22 frente às adversidades climáticas e exposição direta ao sol, Carvalho *et al.* (2021) desenvolveram um abrigo meteorológico empregando pratos de PVC, conforme detalhado em seu estudo. Esses pratos foram dispostos de forma a permitir a circulação de ar ao redor do sensor, ao mesmo tempo em que o protegem da chuva e da radiação solar direta. A estrutura do abrigo foi montada utilizando uma barra roscada, porcas e arruelas, proporcionando estabilidade e facilidade de fixação em diferentes superfícies.

O sistema pode ser alimentado de três formas diferentes, oferecendo flexibilidade de acordo com a disponibilidade de recursos e as necessidades do local de instalação. Uma das opções é a utilização de pilhas em um suporte com 6 unidades em série, conectadas ao Arduino por meio de um plug P4. Essa configuração permite que o sistema opere de forma autônoma, sem a necessidade de uma fonte de alimentação externa. A segunda alternativa é a utilização de uma fonte de alimentação com conector P4, fornecendo energia estável e contínua ao sistema. Por fim, o Arduino também pode ser alimentado por meio de uma conexão USB tipo B, permitindo a utilização de uma fonte de tensão adequada, como um power bank ou um adaptador de energia, assim como na segunda alternativa.

O firmware do Arduino foi desenvolvido utilizando a linguagem de programação C++ e bibliotecas específicas para os sensores e módulos utilizados. O código foi estruturado de forma modular, facilitando a manutenção e a expansão do sistema. O protótipo foi configurado para registrar dados em intervalos de 30 minutos, enquanto a configuração das estações da *Campbell Scientific*, os registros foram a cada 10 minutos. Os dados coletados são armazenados no cartão micro SD, permitindo a coleta de dados mesmo em locais remotos sem acesso à internet.

Realizou-se uma análise detalhada dos custos associados à produção do protótipo Arduino, com o objetivo de compreender o investimento necessário para sua montagem. Essa avaliação financeira contemplou todos os componentes utilizados no projeto. Os itens específicos e seus respectivos

valores estão listados na Tabela 1 abaixo, fornecendo uma visão clara e objetiva do orçamento requerido para a produção do protótipo.

Tabela 1 – Itens utilizados para montagem do protótipo e preço avaliado em abril de 2024.

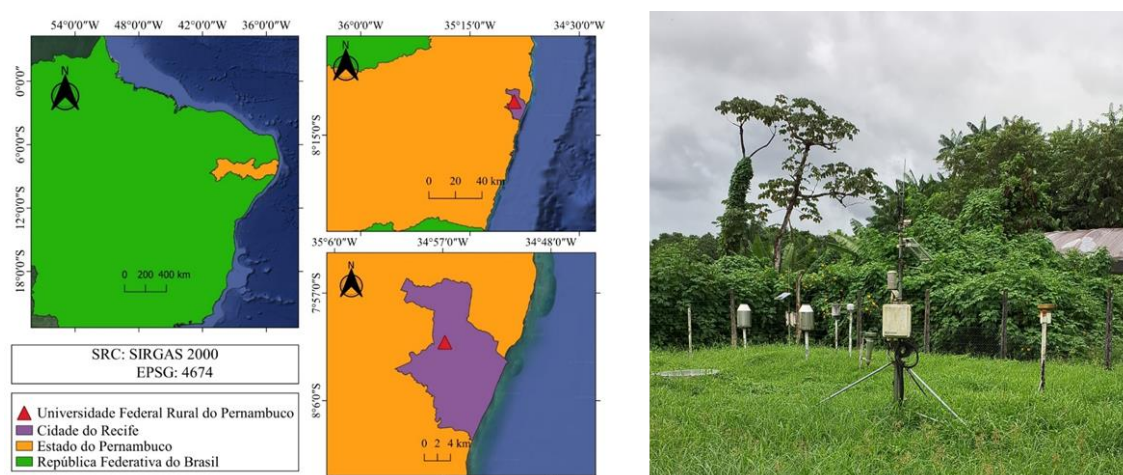
Componente	Preço Un.		Quant.	Total	
Arduino UNO R3	R\$	54,90	1	R\$	54,90
Modulo e Sensor DHT22	R\$	34,90	1	R\$	34,90
Modulo RTC DS1302	R\$	9,50	1	R\$	9,50
Modulo Micro SD	R\$	13,90	1	R\$	13,90
Cabo RJ 45 10 m	R\$	17,90	1	R\$	17,90
Barra roscada 1/4"	R\$	4,00	4	R\$	16,00
Arruelas e Porcas 1/4"	R\$	0,50	16	R\$	8,00
Pratos de PVC	R\$	8,90	1	R\$	8,90
Barra de pino macho	R\$	1,00	1	R\$	1,00
Barra de pino macho/fêmea	R\$	2,00	3	R\$	6,00
Suporte para 6 pilhas AA	R\$	10,36	1	R\$	10,36
Conector p4 macho	R\$	4,90	1	R\$	4,90
Caixa de PVC	R\$	30,00	1	R\$	30,00
Total				R\$	216,26

Fonte: o autor (2024).

2.2 Local de instalação e coleta de dados

A instalação do sistema de monitoramento meteorológico foi na Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), situada na Região Metropolitana do Recife, Pernambuco. A pesquisa foi realizada em uma área rural da universidade, identificada na Figura 2, em um ambiente de clima tropical quente úmido (As' segundo Köppen), com uma temperatura média anual de 25,7 °C e elevada umidade relativa durante todo o ano. As coordenadas do local são 8°01'05,3"S, 34°56'49,4"W, a uma altitude de cerca de 6 metros, em um terreno majoritariamente plano.

Figura 2 – Área experimental da UFRPE onde foi instalado e testado o protótipo Arduino e a estação da Campbell Scientific.



Fonte: o autor (2024).

A localização foi escolhida de forma a garantir condições similares de exposição para comparação com a estação de referência da empresa *Campbell Scientific*, minimizando a influência de fatores externos nas medições.

A seleção da UFRPE como local de instalação proporcionou um ambiente controlado e com infraestrutura adequada para a realização do estudo comparativo. A disponibilidade de uma estação de referência de longo prazo e a possibilidade de instalar os sistemas de baixo custo próximos a ela foram fatores determinantes para a escolha desse local.

Durante o estudo, foram realizadas duas campanhas de monitoramento utilizando o protótipo desenvolvido com a plataforma Arduino e a estação de referência da *Campbell Scientific*. A primeira campanha ocorreu entre os meses de novembro e dezembro de 2023, período no qual foram coletados aproximadamente 800 pares de dados de temperatura e umidade relativa do ar, essa coleta inicial permitiu uma análise preliminar da eficácia do protótipo em comparação com a estação de referência.

Já a segunda campanha de monitoramento foi conduzida entre fevereiro e março de 2024, resultando na obtenção de cerca de 880 pares de dados, esse aumento no volume de dados coletados na segunda campanha proporcionou uma base mais sólida para a avaliação da precisão e confiabilidade do protótipo Arduino em diferentes condições climáticas, abrangendo tanto o período seco quanto o chuvoso na área de monitoramento.

Uma terceira campanha foi realizada no mês de maio de 2024, coletando um total de 980 pares de dados de temperatura e umidade relativa para análise, garantindo mais uma importante base de dados para avaliação do protótipo.

2.3 Análise dos dados coletados

A avaliação da confiabilidade dos dados é um aspecto necessário em estudos comparativos de sistemas de monitoramento meteorológico. Neste estudo, a confiabilidade dos dados registrados pelo protótipo Arduino foi avaliada por meio da comparação com os dados da estação de referência *Campbell Scientific*.

A comparação dos dados registrados foi realizada utilizando técnicas estatísticas. O coeficiente de correlação de Pearson pode ser empregado para medir a força e a direção da relação linear entre as variáveis medidas pelos diferentes sistemas (Mukaka, 2012). Valores do coeficiente de Pearson próximos a 1 indicam uma forte correlação positiva, enquanto valores próximos a -1 indicam uma forte correlação negativa. Além disso, o coeficiente de determinação (R^2) foi calculado para quantificar a proporção da variância nos dados dos sistemas de baixo custo que pode ser explicada pelos dados da estação de referência (Nagelkerke, 1991).

Para avaliar a precisão das medições, foi utilizado o erro médio quadrático (RMSE), que mede a diferença média entre os valores observados pelos sistemas de baixo custo e os valores correspondentes da estação de referência (Willmott; Matsuura, 2005). O RMSE é amplamente utilizado como uma medida da magnitude dos erros de previsão e fornece uma indicação da acurácia dos sistemas em relação à estação de referência.

O gráfico de Bland-Altman é uma ferramenta estatística amplamente utilizada para avaliar a concordância entre dois métodos de medição, especialmente quando se deseja comparar um novo método ou equipamento com um método estabelecido ou de referência (Giavarina, 2015). Esse gráfico é particularmente útil quando se trata de validar novos equipamentos de medição em relação a um equipamento de qualidade já comprovada, pois permite uma análise visual e quantitativa das diferenças entre as medições (Zaki *et al.*, 2012).

A importância do gráfico de Bland-Altman reside na sua capacidade de identificar vieses sistemáticos e outliers entre os métodos de medição. Ele é

construído plotando a diferença entre as medições dos dois métodos contra a média dessas medições, juntamente com os limites de concordância (Bland; Altman, 1999). Esses limites fornecem uma faixa dentro da qual se espera que a maioria das diferenças entre as medições esteja contida. Se a média das diferenças estiver próxima de zero e a maioria dos pontos estiver dentro dos limites de concordância, isso indica uma boa concordância entre o novo equipamento e o equipamento de referência (Chhapola *et al.*, 2015). No entanto, se houver um viés sistemático significativo ou muitos outliers, isso pode sugerir que o novo equipamento precisa de ajustes ou melhorias antes de ser considerado confiável para uso (Bartlett; Frost, 2008).

Portanto, o gráfico de Bland-Altman é uma ferramenta útil para avaliar a confiabilidade e a precisão de novos equipamentos de medição em comparação com um padrão de referência estabelecido.

A influência das condições ambientais na confiabilidade dos dados também foi considerada. Fatores como a exposição à radiação solar direta, chuva e vento podem afetar o desempenho dos sensores e introduzir erros nas medições (Lundquist *et al.*, 2017). A avaliação desses fatores foi realizada por meio da análise de dados meteorológicos complementares e observações visuais durante os períodos de instalação.

Os resultados da avaliação da confiabilidade dos dados foram interpretados com base em estudos anteriores que compararam sistemas de monitoramento meteorológico de baixo custo com estações de referência. Estudos como os realizados por Carvalho *et al.* (2021) e Gomes *et al.* (2022) apresentaram contribuições significativas sobre a aplicabilidade e as limitações de sistemas de baixo custo em diferentes contextos e condições ambientais.

A avaliação abrangente da confiabilidade dos dados, combinando métodos estatísticos, análise de fatores ambientais e comparação com estudos anteriores, permitiu uma compreensão mais completa do desempenho dos sistemas de baixo custo em relação à estação de referência, esses resultados fornecem uma base sólida para a tomada de decisões informadas sobre a aplicabilidade desses sistemas em diferentes contextos de monitoramento meteorológico.

2.4 Métodos de estimativa da evapotranspiração

A evapotranspiração (ET) é um processo fundamental no ciclo hidrológico, representando a perda de água para a atmosfera através da evaporação do solo e da transpiração das plantas (Allen *et al.*, 1998). A estimativa precisa da ET é essencial para o gerenciamento eficiente dos recursos hídricos, especialmente em áreas com baixa disponibilidade hídrica, onde a segurança hídrica é uma preocupação crescente (Fisher *et al.*, 2017).

Em regiões áridas e semiáridas, onde a escassez de água é um desafio constante, a quantificação da ET é crucial para o planejamento e a tomada de decisões relacionadas à irrigação, alocação de água e estratégias de conservação (Moura *et al.*, 2013, Rocha Júnior *et al.*, 2020). A estimativa da ET permite aos gestores de recursos hídricos avaliarem a demanda de água das culturas, otimizar as práticas de irrigação e garantir o uso sustentável dos recursos hídricos limitados (Pereira *et al.*, 2015).

Existem diversos métodos para estimar a ET, variando em complexidade e requisitos de dados, neste estudo, foram utilizados três métodos amplamente aceitos: o método FAO Penman-Monteith, o método de Hargreaves-Samani e o método de Romanenko.

O método FAO Penman-Monteith é considerado o padrão global para a estimativa da ET de referência (ET_o) (Allen *et al.*, 1998). Esse método combina componentes de balanço de energia e aerodinâmicos, levando em consideração variáveis meteorológicas como radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento (Allen *et al.*, 1998). Apesar de sua precisão, o método FAO Penman-Monteith requer um conjunto abrangente de dados meteorológicos, o que pode ser um desafio em áreas com recursos limitados (Sentelhas *et al.*, 2010).

O método de Hargreaves-Samani é uma alternativa mais simples ao método FAO Penman-Monteith, exigindo apenas dados de temperatura do ar e radiação solar extraterrestre (Hargreaves; Samani, 1985). Esse método foi desenvolvido para regiões onde a disponibilidade de dados meteorológicos completos é limitada, tornando-o adequado para aplicações em áreas remotas ou com recursos escassos (Shahidian *et al.*, 2012). Embora seja menos preciso que o método FAO Penman-Monteith, o método de Hargreaves-Samani tem sido

amplamente utilizado e validado em diferentes condições climáticas (Almorox *et al.*, 2015).

O método de Romanenko é outro método simplificado para estimar a ET, baseado principalmente na temperatura do ar e na umidade relativa (Romanenko, 1961). Esse método foi desenvolvido para regiões com clima continental e tem sido aplicado com sucesso em várias partes do mundo (Djaman *et al.*, 2015). O método de Romanenko é particularmente útil quando os dados de radiação solar e velocidade do vento não estão disponíveis, tornando-o uma opção viável para estudos com recursos limitados (Tabari *et al.*, 2013).

Neste estudo, os métodos FAO Penman-Monteith e Hargreaves-Samani foram aplicados aos dados da estação de referência *Campbell Scientific*, enquanto o método de Romanenko foi utilizado para o protótipo Arduino. A comparação dos resultados obtidos por esses métodos permitiu avaliar a adequação dos sistemas de baixo custo para a estimativa da ET em relação à estação de referência. Na Figura 3 tem-se a imagem da estação de referência localizada no Vale do Mimoso.

Figura 3 – Estação da *Campbell Scientific* localizada no Vale do Mimoso.



Fonte: Adaptada de Fontes Júnior (2012)

A estimativa precisa da ET é fundamental para a gestão sustentável dos recursos hídricos, especialmente em áreas com baixa disponibilidade hídrica. A aplicação de diferentes métodos, como FAO Penman-Monteith, Hargreaves-Samani e Romanenko, permite a estimativa da ET em diferentes contextos e níveis de disponibilidade de dados. A comparação desses métodos utilizando sistemas de monitoramento de baixo custo e estações de referência contribui para o desenvolvimento de estratégias acessíveis e eficientes para a quantificação da ET e a promoção da segurança hídrica em regiões vulneráveis.

3 Resultados e discussão

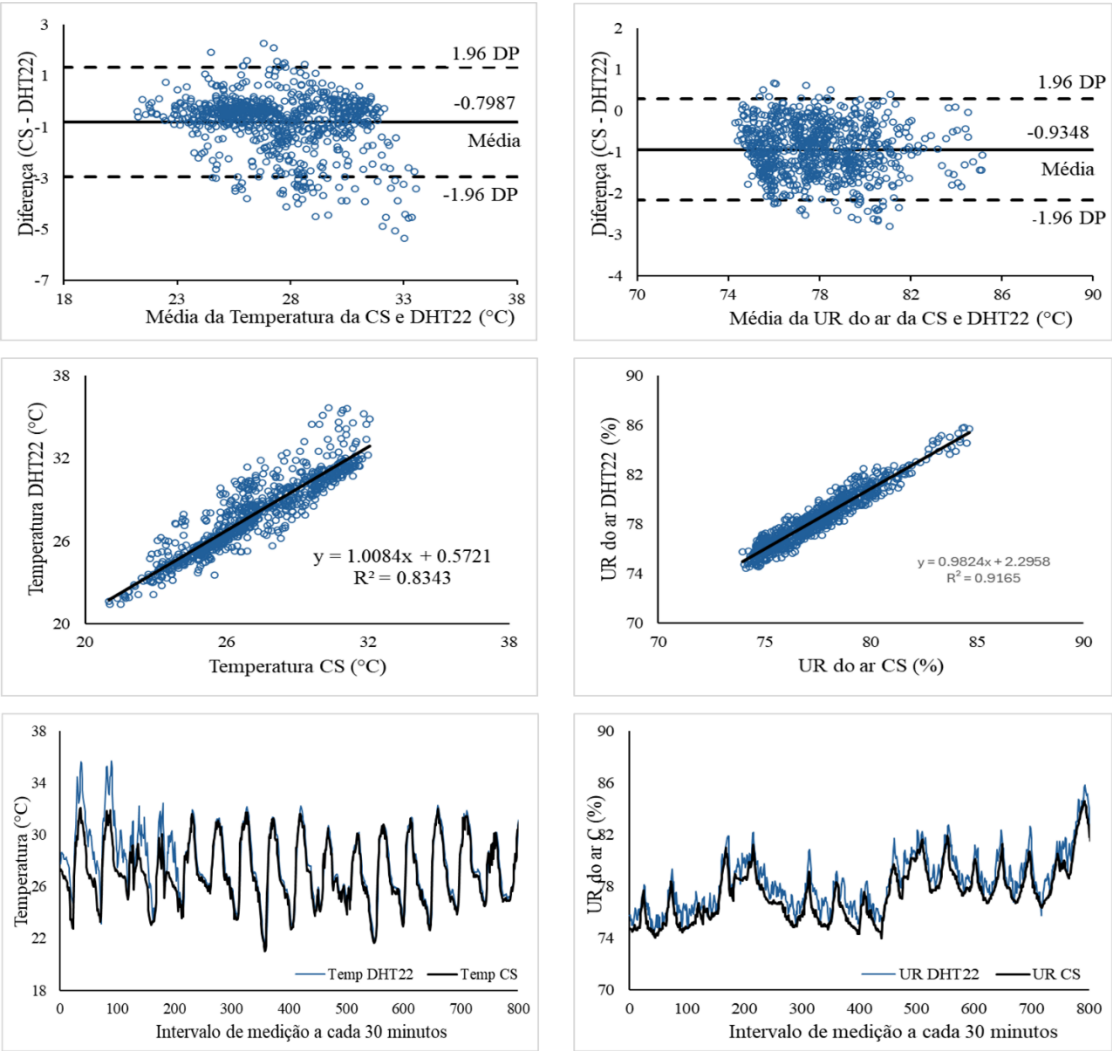
3.1 Análise entre o protótipo Arduino (DHT22) e a estação da *Campbell Scientific* (CS)

Os resultados das comparações entre o protótipo Arduino equipado com o sensor DHT22 e a estação de referência *Campbell Scientific* (CS) para a medição da temperatura do ar (Temp) e umidade relativa do ar (UR) foram coletados em três campanhas distintas: Campanha 1 (C1) entre 17 de novembro e 4 de dezembro de 2023, Campanha 2 (C2) entre 24 de janeiro de 2023 e 11 de fevereiro de 2024 e Campanha 3 (C3) entre 2 e 22 de maio de 2024. A primeira e a segunda campanha contaram com cerca de 800 coletas cada e a terceira com 880 coletas de pares de dados para cada variável (Temp e UR).

As análises estatísticas foram realizadas utilizando gráficos de dispersão, gráficos de linha, análise de Bland-Altman, coeficiente de correlação de Pearson (r) e raiz do erro quadrático médio (RMSE) para avaliar a precisão e a concordância entre o protótipo Arduino e a estação de referência CS. Os resultados detalhados para cada campanha serão apresentados a seguir, permitindo uma avaliação do desempenho do protótipo Arduino em comparação com a estação CS. Nas Figuras 4, 5 e 6 tem-se os resultados obtidos para C1, C2 e C3 respectivamente, para o protótipo com DHT22 e a CS.

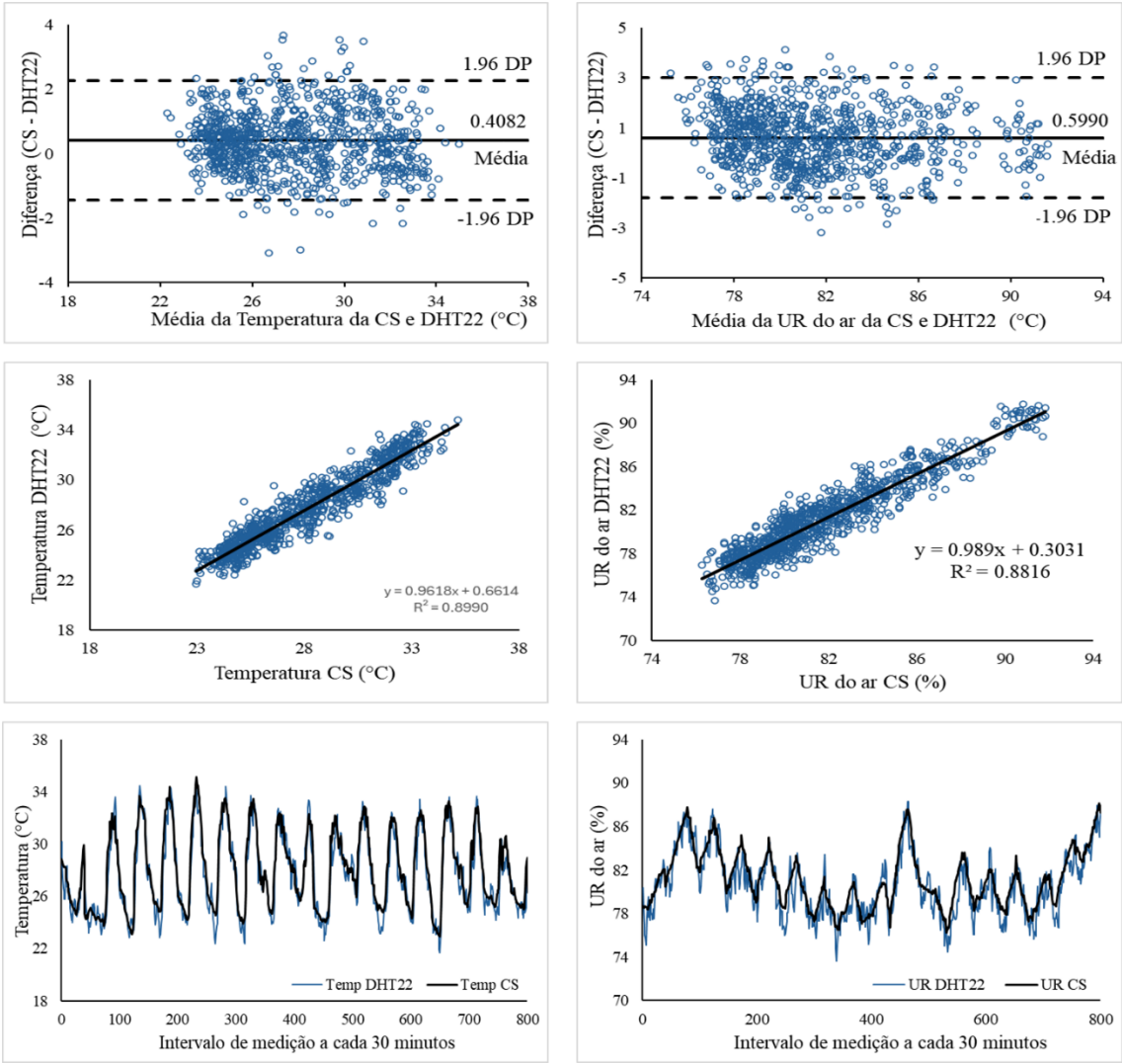
Figura 4 - Dados de medição do Protótipo Arduino x Estação *Campbell Scientific* na campanha

1.



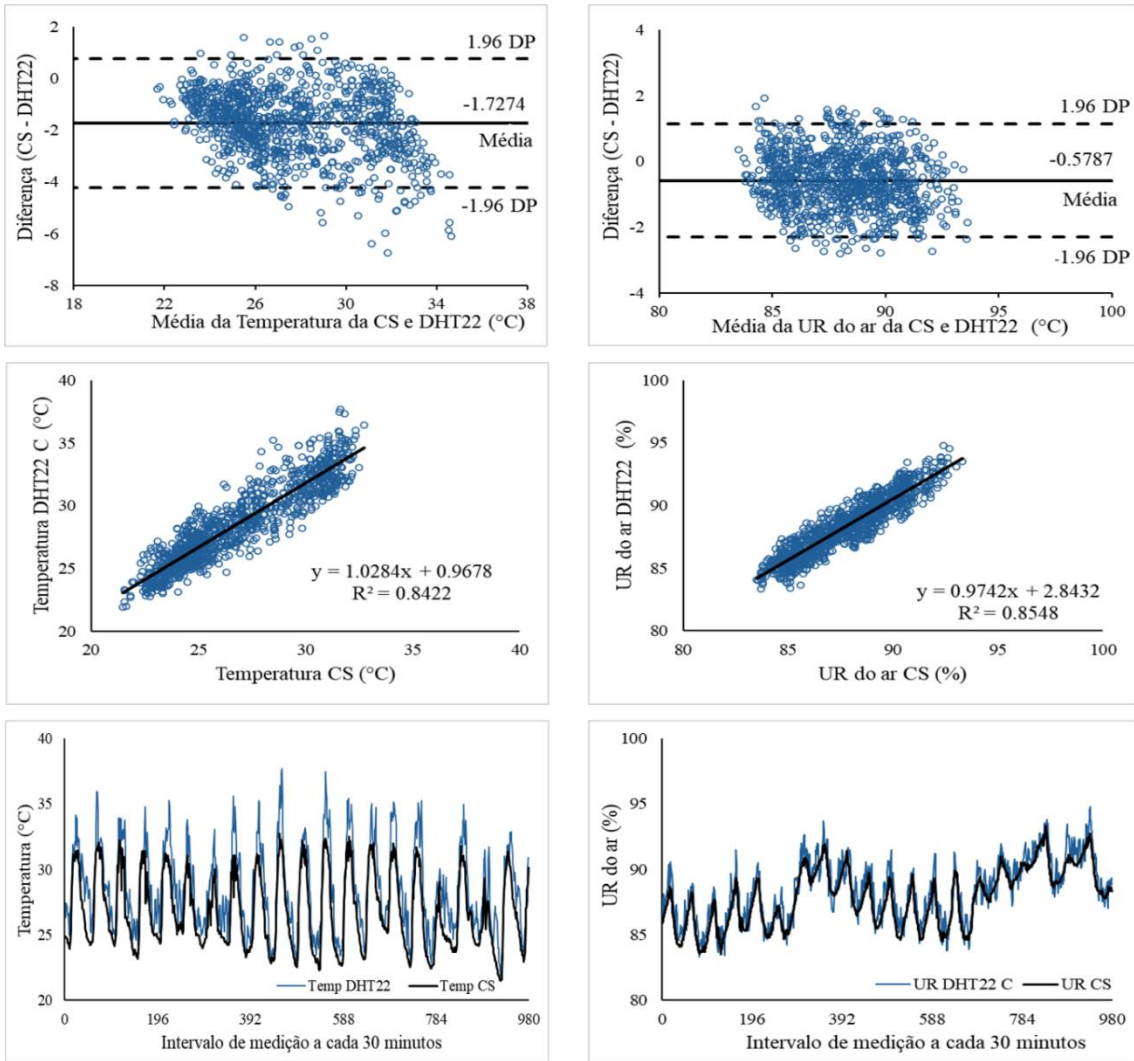
Fonte: o autor (2024).

Figura 5 - Dados de medição do Protótipo Arduino x Estação *Campbell Scientific* na campanha 2.



Fonte: o autor (2024).

Figura 6 - Dados de medição do Protótipo Arduino x Estação *Campbell Scientific* na campanha 3.



Fonte: o autor (2024).

Ainda referente aos dados de coleta de cada campanha foi montada a Tabela 2 com os resultados das três campanhas para o (r), (R^2), (RMSE) e Bland-Altman apresentada abaixo.

Tabela 2 – Resumo das análises elaboradas para as 3 campanhas de UR e temperatura.

	C1 T	C1 UR	C2 T	C2 UR	C3 T	C3 UR
r	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	-1,0000	-1,0000
R ²	0,8343	0,9165	0,8990	0,8816	0,8422	0,8548
RMSE	1,8356	1,2665	1,0604	1,8629	4,5997	4,5314
Média de Bland-Altman	-0,7987	-0,9348	0,4082	0,5990	-1,7274	-0,5787

C1 T- Campanha 1 para temperatura, C1 UR – Campanha 1 para Umidade Relativa do ar, C2 T- Campanha 2 para temperatura, C2 UR – Campanha 2 para Umidade Relativa do ar, C3 T- Campanha 3 para temperatura, C3 UR – Campanha 3 para Umidade Relativa do ar.

Fonte: o autor (2024).

Os dados obtidos em C1 para a temperatura apresentou uma forte correlação linear positiva ($r = 1$) e um alto coeficiente de determinação ($R^2 = 0,8343$), indicando uma forte relação entre as medições do protótipo DHT22 e da estação de referência CS (Nagelkerke, 1991; Mukaka, 2012). O RMSE de 1,8356 sugere uma boa precisão das medições de temperatura (Willmott e Matsuura, 2005). A análise de Bland-Altman revelou uma média da diferença de -0,7987, com maior incidência de dados entre a média e o limite superior, e alguns pontos abaixo e distantes do limite inferior, onde ocorre maior dispersão dos pontos destoantes da média, o que acabou levando a um viés levemente negativo (Giavarina, 2015).

Quanto à umidade relativa do ar, os resultados também foram promissores. A forte correlação linear positiva ($r = 1$) e o alto coeficiente de determinação ($R^2 = 0,9165$) indicam uma forte relação entre as medições do protótipo DHT22 e da estação de referência CS (Nagelkerke, 1991; Mukaka, 2012). O RMSE de 1,2665 sugere uma boa precisão das medições de umidade relativa (Willmott; Matsuura, 2005). A análise de Bland-Altman apresentou uma média da diferença de -0,9348, com poucos pontos fora da área dos limites superior e inferior e um leve viés negativo (Giavarina, 2015).

Os dados obtidos em C2 para a temperatura apresentou uma forte correlação linear positiva ($r = 1$) e um alto coeficiente de determinação ($R^2 = 0,8990$), indicando uma relação forte entre as medições do protótipo DHT22 e

da estação de referência CS (Nagelkerke, 1991; Mukaka, 2012). O RMSE de 1,0604 sugere uma excelente precisão das medições de temperatura (Willmott; Matsuura, 2005). A análise de Bland-Altman revelou uma média da diferença de 0,4082, com maior incidência de dados entre o limite superior indicando um leve viés positivo entre os dados (Giavarina, 2015).

Quanto à umidade relativa do ar, os resultados também foram consistentes. A forte correlação linear positiva ($r = 1$) e o alto coeficiente de determinação ($R^2 = 0,8816$) indicam uma relação forte entre as medições do protótipo DHT22 e da estação de referência (Nagelkerke, 1991; Mukaka, 2012). O RMSE de 1,8629 sugere uma excelente precisão das medições de umidade relativa (Willmott; Matsuura, 2005). A análise de Bland-Altman apresentou uma média da diferença de 0,5990, com poucos pontos fora da área dos limites superior e inferior e maior quantidade acima do zero, indicando um leve viés positivo (Giavarina, 2015).

Os dados obtidos em C3 para a temperatura apresentou uma forte correlação linear negativa ($r = -1$) e um alto coeficiente de determinação ($R^2 = 0,8422$), indicando uma relação inversa entre as medições do protótipo DHT22 e da estação de referência CS (Nagelkerke, 1991; Mukaka, 2012). O RMSE de 4,5997 sugere uma menor precisão das medições de temperatura em comparação com as campanhas anteriores (Willmott; Matsuura, 2005). A análise de Bland-Altman revelou uma média da diferença de -1,7274, com maior incidência de dados entre a média e o limite superior, e uma maior dispersão de pontos abaixo da média, com alguns abaixo do limite inferior, o que puxou a média para o eixo negativo, indicando um viés negativo das medições (Giavarina, 2015). Essa distribuição dos pontos no gráfico de Bland-Altman indica uma menor concordância entre as medições do protótipo DHT22 e da estação de referência para a temperatura em C3.

Quanto à umidade relativa do ar, os resultados também apresentaram algumas diferenças. A forte correlação linear negativa ($r = -1$) e o alto coeficiente de determinação ($R^2 = 0,8548$) indicam uma relação inversa entre as medições do protótipo DHT22 e da estação de referência (Mukaka, 2012; Nagelkerke, 1991). O RMSE de 4,5314 sugere uma menor precisão das medições de umidade relativa em comparação com as campanhas anteriores (Willmott; Matsuura, 2005). A análise de Bland-Altman apresentou uma média da diferença

de -0,5787, com poucos pontos fora da área dos limites superior e inferior (Giavarina, 2015). Apesar da distribuição dos pontos no gráfico de Bland-Altman indicar uma boa concordância entre as medições do protótipo DHT22 e da estação de referência para a umidade relativa do ar, a correlação negativa e o maior RMSE sugerem algumas discrepâncias.

Em resumo, as três campanhas de monitoramento, utilizando o protótipo Arduino como alternativa de baixo custo, apresentaram resultados variados para as medições de temperatura e umidade relativa do ar. As Campanhas 1 e 2 demonstraram fortes correlações lineares positivas, altos coeficientes de determinação e excelente precisão para ambas as variáveis, em comparação com a estação de referência. A análise de Bland-Altman indicou boa concordância entre as medições.

A Campanha 3 apresentou correlações lineares negativas e menor precisão nas medições de temperatura e umidade relativa do ar, com valores de RMSE mais elevados em comparação com as campanhas anteriores. Apesar das diferenças observadas na Campanha 3, o protótipo Arduino ainda demonstra potencial como uma alternativa de baixo custo para o monitoramento, porém, requer mais análises para identificar e corrigir as fontes de discrepâncias. Os resultados das três campanhas destacam a importância de realizar múltiplas avaliações em diferentes condições para validar a confiabilidade e a precisão de novos dispositivos de monitoramento climático.

3.2 Métodos para estimativa da evapotranspiração de referência

A análise comparativa dos métodos alternativos para estimativa da evapotranspiração foi realizada utilizando como referência os dados da estação da *Campbell Scientific* localizada no Vale do Mimoso, e gerenciada pelo Laboratório de Água e Solo. Essa estação forneceu os dados necessários para calcular a evapotranspiração pelos métodos de Penman-Monteith e Hargreaves-Samani, considerando os valores diários registrados durante o período de 2020 a 2023. A escolha desses métodos como base para comparação se deve à sua ampla aceitação e utilização em estudos de evapotranspiração em diferentes regiões do mundo.

Com o objetivo de avaliar a aplicabilidade do método de Romanenko na região semiárida do Nordeste brasileiro, foi realizado um ajuste desse método

utilizando os dados obtidos na estação de referência. O método de Romanenko, originalmente desenvolvido para estimativa da evapotranspiração em regiões de clima temperado, foi adaptado para melhor representar as condições climáticas locais, esse ajuste foi possível através de uma análise minuciosa dos dados coletados.

Para realizar o ajuste do método de Romanenko, foi utilizada a ferramenta Solver do Microsoft Excel. Essa ferramenta permite a otimização de equações através da minimização dos erros entre os valores estimados e os valores de referência. No caso deste estudo, o objetivo foi encontrar os coeficientes da equação de Romanenko que resultassem na melhor aproximação dos valores de evapotranspiração calculados pelos métodos de Penman-Monteith e Hargreaves-Samani. O processo de ajuste envolveu a definição de restrições e a iteração dos coeficientes até que se obtivesse a equação que melhor se adequasse às condições da região semiárida, a Equação (1) ajustada para a região foi:

$$ET_o = 2,2134 \left(1 + \left(\frac{T_{med}}{25} \right) \right)^2 \left(1 - \left(\frac{e_a}{e_s} \right) \right) + 2,7907 \quad (1)$$

onde e_a é a pressão real de vapor e o e_s a pressão de saturação de vapor em kPa. Esses parâmetros são obtidos através das Equações (2) e (3):

$$e_s = 0,6108 \wedge \left[17,27 * \frac{T_{med}}{T_{med} + 237,3} \right] \quad (2)$$

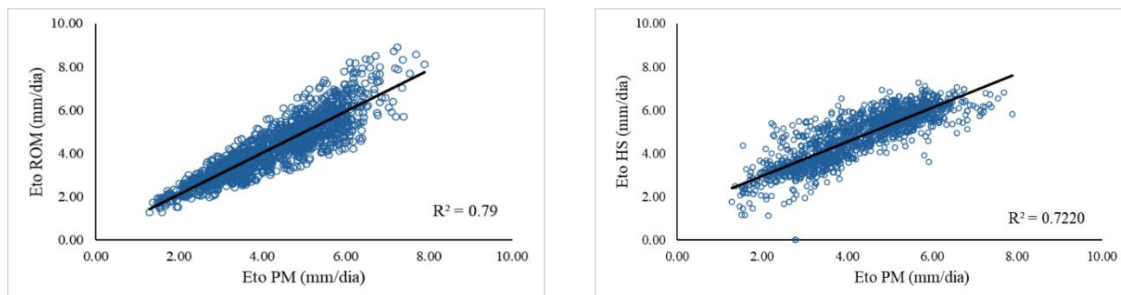
$$e_a = e_s * \frac{UR_{med}}{100} \quad (3)$$

onde, T_{med} é a temperatura média e a UR_{med} a umidade relativa do ar média.

Após o ajuste do método de Romanenko, foi possível realizar uma comparação direta entre os valores de evapotranspiração estimados por esse método e aqueles calculados pelos métodos de referência. Essa comparação permitiu avaliar a precisão e a confiabilidade do método de Romanenko ajustado para a região em estudo. A Figura 7 representa o gráfico de dispersão com o R^2

para a comparação dos métodos de Romanenko com o de Penman-Monteith e o de Hargreaves-Samani em relação ao método de Penman_monteith.

Figura 7 – Comparação dos resultados de Eto entre Romanenko x Penman-Monteith e Hargreaves-Samani x Penman-Monteith, respectivamente.

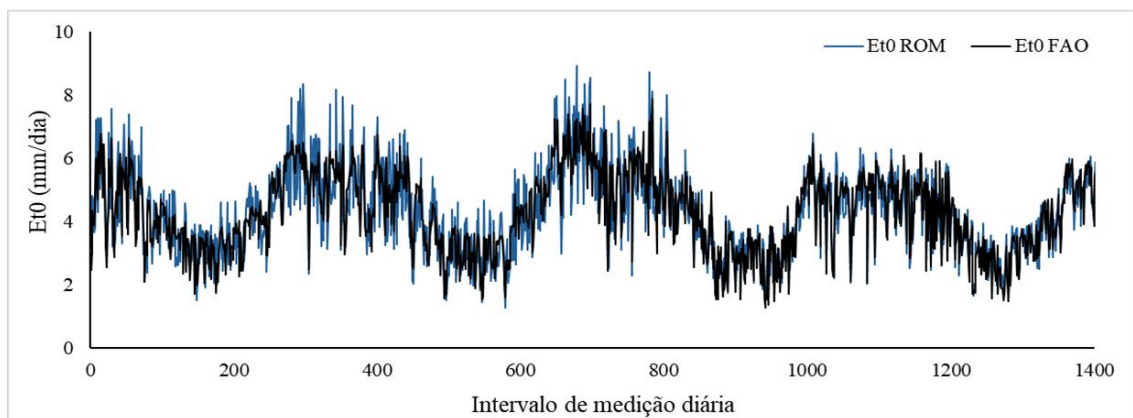
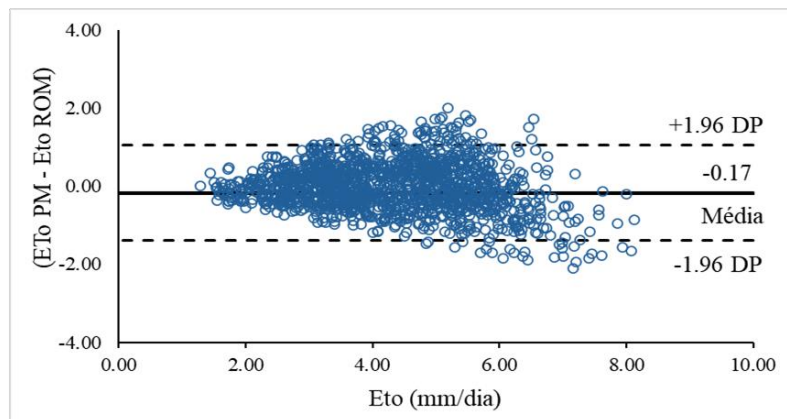


Fonte: o autor (2024).

Os resultados obtidos demonstraram que o método de Romanenko ajustado apresentou uma boa correlação com os métodos de Penman-Monteith para a região, apresentando um $R^2 = 0,7900$. A mesma análise entre os métodos de Hargreaves-Samani para o método de Penman-Monteith, apresentou um $R^2 = 0,7220$ para a mesma amostragem de dados indicando sua adequabilidade para estimativa da evapotranspiração na região semiárida do Nordeste brasileiro. Esse ajuste regional do método de Romanenko representa um avanço significativo para a compreensão e quantificação da evapotranspiração em áreas com características climáticas semelhantes, fornecendo uma alternativa viável e acessível para estudos hidrológicos e de manejo de recursos hídricos nessas regiões.

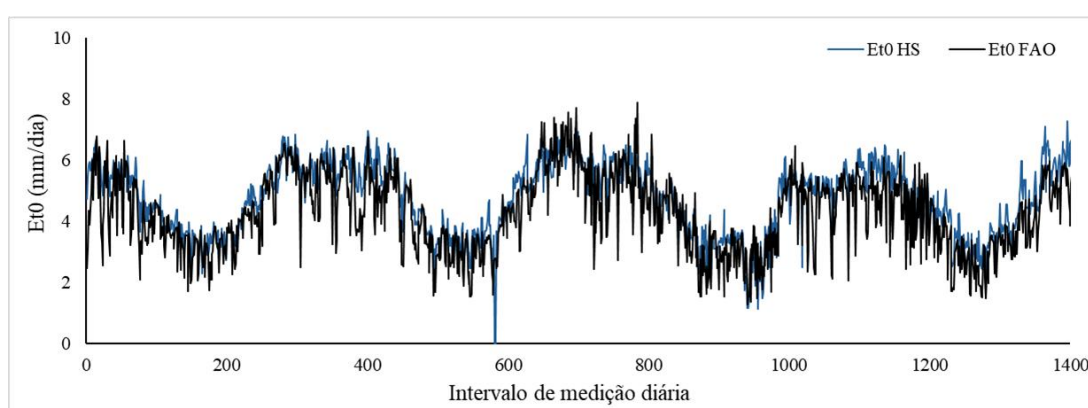
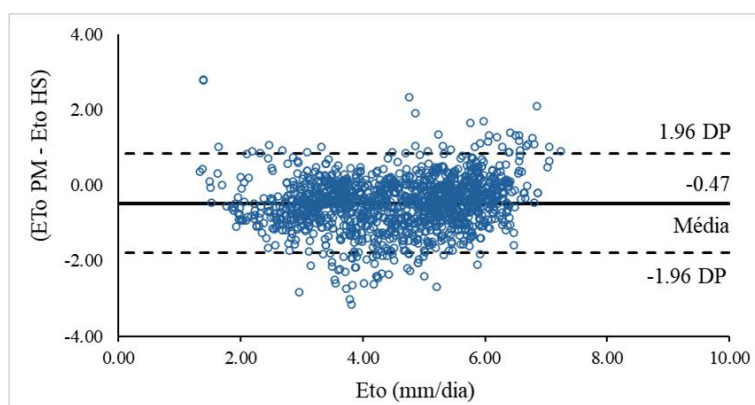
Ainda na comparação entre os métodos para determinação da evapotranspiração, temos a apresentação de um gráfico de linhas temporal, evidenciando as variações e tendências. Além disso, a análise de Bland-Altman é utilizada para comparar os métodos de estimativa, tanto de Romanenko quanto de Hargreaves-Samani em relação ao método de Penman-Monteith, destacando as diferenças e a concordância entre eles. Essas comparações são essenciais para avaliar a precisão e aplicabilidade dos métodos para o local de estudo. Os resultados são apresentados nas Figuras 8 e 9.

Figura 8 – Análise de Bland-Altman e comparação temporal entre Romanenko x Penman-Monteith.



Fonte: o autor (2024).

Figura 9 – Análise de Bland-Altman e comparação temporal entre Hargreaves-Samani x Penman-Monteith.



Fonte: o autor (2024).

Ainda referente as estimativas da E_t0 , a Tabela 3 foi montada com os resultados dos dois métodos analisando o (r), (R^2), (RMSE) e Bland-Altman apresentada abaixo.

Tabela 3 – Resumo das análises elaboradas para a comparação dos métodos de Romanenko e Hargreaves-Samani.

Análises	ROM x FAO	HS x FAO
r	1	1
R^2	0,7900	0,7220
RMSE	0,3820	0,6800
Média Bland-Altman	-0,1700	-0,4750

ROM x FAO – Comparação entre o método de Romanenko e o da FAO, HS x FAO – Comparação entre o método de Hargreaves-Samani e o da FAO.

Fonte: o autor (2024).

A correlação perfeita ($r = 1$) entre HS e FAO-PM indica uma relação linear direta entre os dois métodos, sugerindo que, conforme o valor estimado pelo método HS aumenta, o mesmo ocorre com o valor estimado pelo FAO-PM. No entanto, o coeficiente de determinação ($R^2 = 0,722$) revela que apenas 72,2% da variação nos dados de evapotranspiração estimados pelo HS pode ser explicada pelo método FAO-PM. Isso sugere que, apesar da forte correlação, existem outras variáveis não consideradas pelo método HS que influenciam os resultados.

O RMSE = 0,680 indica que, em média, as estimativas do método HS desviam-se em 0,680 mm/dia das estimativas do FAO-PM, esse valor, embora relativamente baixo, aponta para uma precisão moderada do método HS em comparação ao FAO-PM.

A análise comparativa entre os métodos de estimativa de evapotranspiração Hargreaves-Samani (HS), Romanenko (ROM) e FAO Penman-Monteith (FAO-PM) revelou que ambos os métodos alternativos apresentam forte correlação com o método padrão FAO-PM. No entanto, o método ROM demonstrou ser mais preciso e com menor viés sistemático em relação ao FAO-PM quando comparado ao método HS para a região estudada.

A média de Bland-Altman (-0,475) para HS x FAO-PM sugere que o método HS tende a superestimar a evapotranspiração em relação ao FAO-PM, indicando um viés sistemático. Por outro lado, a média de Bland-Altman (-0,17) para ROM x FAO-PM indica um menor viés sistemático nas estimativas de evapotranspiração entre esses métodos.

Além disso, o coeficiente de determinação ($R^2 = 0,790$) para ROM x FAO-PM é superior ao observado para HS x FAO-PM, indicando que 79% da variação nos dados de evapotranspiração estimados pelo ROM pode ser explicada pelo método FAO-PM, sugerindo uma concordância ligeiramente maior entre ROM e FAO-PM do que entre HS e FAO-PM.

O RMSE mais baixo (0,382) para ROM em comparação com HS indica uma maior precisão do método Romanenko em estimar a evapotranspiração em relação ao padrão FAO-PM, sugerindo que as estimativas de ROM estão mais próximas das estimativas do FAO-PM do que as de HS.

Portanto, com base nos valores de R^2 , RMSE e média de Bland-Altman, conclui-se que o método ROM é preferível para estimativas de

evapotranspiração quando comparado ao HS para a região estudada, apresentando maior precisão e menor viés sistemático em relação ao método padrão FAO-PM.

A análise comparativa realizada neste estudo evidencia a importância da adaptação e ajuste dos métodos de estimativa da evapotranspiração para as condições específicas de cada região. A utilização de dados locais e a aplicação de técnicas de otimização, como a ferramenta solver, permitem aprimorar a precisão e a confiabilidade desses métodos, contribuindo para uma melhor compreensão dos processos hidrológicos e para o desenvolvimento de estratégias de gestão dos recursos hídricos mais eficientes e sustentáveis.

3.3 Análises e melhorias futuras

O objetivo principal deste trabalho foi desenvolver um sistema baseado em Arduino que auxilie na gestão eficiente da água, através do monitoramento e otimização da evapotranspiração. O projeto apresenta potencial para se tornar uma ferramenta que não apenas monitore essa variável, mas que também integre dados de precipitação para calcular a evapotranspiração pelo método de Romanenko. Isso permitirá calcular o tempo de irrigação necessário e informar ao agricultor, otimizando o uso da água na agricultura e contribuindo para a sustentabilidade dos recursos hídricos.

Além disso, o sistema visa um projeto para ser alimentado por bateria e equipado com painel solar, garantindo maior autonomia e solucionando problemas relacionados à dificuldade de manter o sistema constantemente ligado. Essa característica é crucial para garantir a operacionalidade contínua do sistema, especialmente em áreas remotas ou de difícil acesso, onde a energia elétrica pode ser um empecilho.

Outro ponto importante é a realização de mais testes para verificar a durabilidade dos sensores utilizados, bem como para avaliar a qualidade dos dados medidos. Esses testes são essenciais para assegurar que o sistema seja não apenas eficiente e econômico, mas também confiável e preciso a longo prazo.

Avaliar a durabilidade dos sensores sob diferentes condições ambientais e de uso contínuo permitirá identificar possíveis melhorias no protótipo. Da mesma forma, a avaliação da qualidade dos dados é crucial para garantir que as

recomendações de irrigação sejam precisas e baseadas em informações confiáveis, maximizando assim os benefícios para os agricultores e para a sustentabilidade da agricultura.

4 Conclusões

1. Nas duas primeiras campanhas, o protótipo Arduino demonstrou alta precisão e confiabilidade, com correlação perfeita ($r = 1$), entretanto, na terceira campanha, a precisão diminuiu significativamente, evidenciada por uma correlação linear negativa ($r = -1$) e a presença de viés nas medições, indicando variações na precisão do protótipo sob diferentes condições.
2. O método de Romanenko, após ajustes, apresentou alta precisão e confiabilidade na estimativa de evapotranspiração para o Nordeste brasileiro semiárido.
3. O método de Hargreaves-Samani, mostra-se razoavelmente adequado para estimar a evapotranspiração na região semiárida do Nordeste brasileiro.
4. Ao comparar ambos os métodos em relação ao FAO-PM, o método de Romanenko ajustado demonstra ser mais preciso e com menor viés sistemático do que o método de Hargreaves-Samani, isso sugere que, para a região semiárida do Nordeste brasileiro, o ROM apresentou melhor desempenho.
5. Apesar das discrepâncias na campanha 3, os resultados enfatizam o potencial do Arduino como uma alternativa de baixo custo para monitoramento ambiental, necessitando de ajustes para melhorar a precisão, e maiores testes para verificação da durabilidade.

Referências

ADAFRUIT. DHT22 temperature-humidity sensor + extras. Adafruit Industries, 2023. Disponível em: <https://www.adafruit.com/product/385>. Acesso em: 12 de março de 2024.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop Evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, **Rome**, v. 300, n. 9, p. D05109, 1998.

ARDUINO. What is Arduino? Arduino, 2023. Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>. Acesso em: 12 de março de 2024.

ARINAITWE, M.; OKEDI, J. IoT-based data and analytic hierarchy process to map groundwater recharge with stormwater. **Water Scienc Technol**, p. 529-547, 2024.

BARTLETT, J. W.; FROST, C. Reliability, repeatability and reproducibility: Analysis of measurement errors in continuous variables. **Ultrasound in Obstetrics and Gynecology**, v. 31, n. 4, p. 466-475, 2008.

BLAND, J. M.; ALTMAN, D. G. Measuring agreement in method comparison studies. **Statistical Methods in Medical Research**, v. 8, n. 2, p. 135-160, 1999.

CARVALHO, A. A.; MEDEIROS, V. W. C. de; GONÇALVES, G. E. Aplicação de sensores de baixo custo na estimativa da evapotranspiração potencial. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 6, n. 2, p. 119-127, 2021.

CHAKRABORTY, S.; MISHRA, S. K.; PANDEY, R. P.; CHAUBE, U. C. Longterm Changes of Irrigation Water Requirement in the Context of Climatic Variability. **ISH Journal of Hydraulic Engineering**, v. 19, n. 3, p. 200-213, 2013.

CHHAPOLA, V.; KANWAL, S. K.; BRAR, R. Reporting standards for Bland-Altman agreement analysis in laboratory research: A cross-sectional survey of current practice. **Annals of Clinical Biochemistry**, v. 52, n. 3, p. 382-386, 2015.

COSTA, D. A. M.; TURCO, J. E. P.; SANTANA, M. A. A.; FURLANI, C. E. A. Calibração e verificação de sensores para estimativa da evapotranspiração de referência. **Caderno Pedagógico**, vol. 21, n. 8, 2024.

DJAMAN, K.; BALDE, A.B.; SOW, A.; MULLER, B.; IRMAK, S. Evaluation of sixteen reference evapotranspiration methods under Sahelian conditions in the Senegal River Valley. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 3, n. 2, p. 139-159, 2015.

ORTIZ, M. E.; MOLINA, J. P. A.; JIMÉNEZ, S. I. B.; BARRENTOS, J. H.; GUEVARA, H. J. P.; MIRANDA, A S. Development of Low-Cost IoT System for Monitoring Piezometric Level and Temperature of Groundwater. **Sensors**, v. 23, n. 23, 2023.

FISHER, J. B.; MELTON, F.; MIDDLETON, E.; HAIN, C.; ANDERSON, M.; ALLEN, R.; MCCABE, M. F.; HOOK, S.; BALDOCCHI, D.; TOWNSEND, P. A.; KILIC, A.; TU, K.; MIRALLES, D. D.; PERRET, J.; LAGOUARDE, J.-P.; WALISER, D.; PURDY, A. J.; FRENCH, A.; SCHIMEL, D.; FAMIGLIETTI, J. S.; STEPHENS, G.; WOOD, E. F. The future of evapotranspiration: Global requirements for ecosystem functioning, carbon and climate feedbacks, agricultural management, and water resources. **Water Resources Research**, v. 53, p. 2618-2626, 2017.

GAZNAYEE, H. A. A.; ZAKI, S. H.; AL-QURAISHI, A. M. F.; HAKZI, K.; RAZVANCHY, H.; RIKSEN, M.; MAHDI, K. N. M. Integrating Remote Sensing Techniques and Meteorological Data to Assess the Ideal Irrigation System Performance Scenarios for Improving Crop Productivity. **Water**, v. 15, n. 8, p. 1605, 2023.

GIAVARINA, D. Understanding Bland Altman analysis. **Biochemia Medica**, v. 25, n. 2, p. 141-151, 2015.

GOMES, N. F.; MEDEIROS, V. W. C.; PANDORFI, H.; GONÇALVES, G. E.; SANTANA, T. C.; COSTA, H. D. F. Desenvolvimento de um Sistema Computacional Embarcado para Aferição de Índice de Conforto Térmico Aplicado ao Bem-estar Animal. In: **WORKSHOP DE COMPUTAÇÃO APLICADA À GESTÃO DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS NATURAIS (WCAMA)**, 13., 2022, Niterói. Anais [...]. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 2022. p. 71-80.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Reference crop evapotranspiration from temperature. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 1, n. 2, p. 96-99, 1985.

KIRAGA, S.; PETERS, R. T.; MOLAEI, B.; EVETT, S. R.; MAREK, G. Reference Evapotranspiration Estimation Using Genetic Algorithm-Optimized Machine Learning Models and Standardized Penman–Monteith Equation in a Highly Advective Environment. **Water**, v. 16, n. 12, 2024.

LUNDQUIST, J. K.; WILCZAK, J. M.; ASHTON, R.; BIANCO, L.; BREWER, W. A.; CHOUKULKAR, A.; CLIFTON, A.; DEBNATH, M.; DELGADO, R.; FRIEDRICH, K. Assessing State-of-the-Art Capabilities for Probing the Atmospheric Boundary Layer: The XPIA field campaign. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 98, n. 2, p. 289-314, 2017.

MOURA, A. R. C.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; ANTONINO, A. C. D.; AZEVEDO, J. R. G. de; SILVA, B. B.; OLIVEIRA, L. M. M. de. Evapotranspiração de referência baseada em métodos empíricos em bacia experimental no estado de Pernambuco - Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 2, 2013.

MUKAKA, M. M. Statistics corner: A guide to appropriate use of correlation coefficient in medical research. **Malawi Medical Journal**, 24(3), 69-71, 2012.

NAGELKERKE, N. J. D. A note on a general definition of the coefficient of determination. **Biometrika**, v. 78, n. 3, p. 691-692, 1991.

PEREIRA, L. S.; ALLEN, R. G.; SMITH, M.; RAES, D. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. **Agricultural Water Management**, v. 147, p. 4-20, 2015.

ROMANENKO, V. A. Computation of the autumn soil moisture using a universal relationship for a large area. **Proceedings of Ukrainian Hydrometeorological Research Institute**, v. 3, p. 12-25, 1961.

ROCHA JÚNIOR, R. L.; SILVA, F. D. dos S.; COSTA, R. L.; GOMES, H. B.; GOMES, H. B.; SILVA, M. C. L.; PINTO, D. D. C.; HERDIES, D. L.; CABRAL JÚNIOR, J. B.; PITA-DÍAZ, O. Mudança de longo prazo e regionalização da evapotranspiração de referência no Nordeste Brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. Especial, p. 891-902, 2023.

SENTELHAS, P. C.; GILLESPIE, T. J.; SANTOS, E. A. Evaluation of FAO Penman–Monteith and alternative methods for estimating reference evapotranspiration with missing data in Southern Ontario, Canada. **Agricultural Water Management**, v. 97, n. 5, p. 635-644, 2010.

SHAHIDIAN, S.; SERRALHEIRO, R.; SERRANO, J.; TEIXEIRA, J.; HAIE, N.; SANTOS, F. Hargreaves and other reduced-set methods for calculating evapotranspiration. In: *Evapotranspiration - Remote Sensing and Modeling*. **IntechOpen**, 2012.

SILVA, W. R. F.; MENDES, K. G.; FERREIRA, R. S. Desenvolvimento de uma estação meteorológica a partir de materiais reutilizados e sensores de baixo custo. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 46, 2024.

TABARI, H.; GRISMER, M. E.; TRAJKOVIC, S. Comparative analysis of 31 reference evapotranspiration methods under humid conditions. **Irrigation Science**, v. 31, n. 2, p. 107-117, 2013.

TARARA, J. M.; HOHEISEL, G.-A. Low-cost shielding to minimize radiation errors of temperature sensors in the field. **HortScience**, v. 42, n. 6, p. 1372-1379, 2007.

VELASCO-MUÑOZ, J. F.; AZNAR-SÁNCHEZ, J. A.; BELMONTE-UREÑA, L. J.; ROMÁN-SÁNCHEZ, I. M. Sustainable water use in agriculture: A review of worldwide research. **Sustainability**, 11(5), 1220, 2019.

WILLMOTT, C. J.; MATSUURA, K. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. **Climate Research**, v. 30, n. 1, p. 79-82, 2005.

ZAKI, R.; BULGIBA, A.; ISMAIL, R.; ISMAIL, N. A. Statistical methods used to test for agreement of medical instruments measuring continuous variables in method comparison studies: A systematic review. **PLoS ONE**, v. 7, n. 5, 2012.

CAPÍTULO IV

CONCLUSÃO GERAL

Neste estudo, foram obtidos resultados que podem auxiliar na gestão dos recursos hídricos no semiárido pernambucano, com foco na dinâmica de recarga e rebaixamento do lençol freático, bem como na qualidade da água e a análise de métodos alternativos para estimativas da evapotranspiração.

- A análise da variabilidade do CRD e da precipitação revelou uma relação inversa entre o CRD e o nível potenciométrico, influenciada pela variabilidade da precipitação e eventos climáticos extremos, como El Niño e La Niña, que apresentaram padrões distintos de precipitação na região.
- A variação espacial e temporal do nível potenciométrico em 2023, utilizando semivariogramas e mapas de krigagem, evidenciou uma dependência espacial significativa, influenciada por fatores locais como a heterogeneidade do aquífero e a distribuição das áreas de recarga e descarga.
- A análise da distribuição espacial e temporal da condutividade elétrica (CE) no ano de 2023 revelou uma dependência espacial variando de forte a moderada, com as regiões de maior CE situadas na parte central do vale.
- A análise do pH indicou que, de maneira geral, os valores se mantiveram dentro da faixa ideal de 6,5 a 8,5, apesar de algumas variações pontuais e outliers que requerem investigação adicional.
- O monitoramento contínuo do nível d'água no poço Pz P4, juntamente com dados de precipitação e estimativas de extração de água para irrigação, evidenciou a influência significativa da extração de água no rebaixamento do aquífero.
- Nas duas primeiras campanhas, o protótipo Arduino demonstrou alta precisão e confiabilidade, com correlação perfeita. No entanto, na terceira campanha, a precisão diminuiu significativamente, evidenciada por uma correlação linear negativa e a presença de viés nas medições, indicando variações na precisão do protótipo sob diferentes condições.

- O método de Romanenko, após ajustes, apresentou boa precisão e confiabilidade na estimativa de evapotranspiração para o semiárido brasileiro.
- O método de Hargreaves-Samani mostrou-se levemente abaixo do método de Romanenko para estimar a evapotranspiração na região semiárida brasileira.
- Ao comparar ambos os métodos em relação ao FAO-PM, o método de Romanenko ajustado demonstrou ser mais preciso e com menor viés sistemático do que o método de Hargreaves-Samani para o semiárido brasileiro.