

THAYNÁ ALICE BRITO ALMEIDA

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DA ADEQUAÇÃO E  
DISPONIBILIDADE DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS ALUVIAIS E DE REUSO PARA  
FINS AGRÍCOLAS NO SEMIÁRIDO

Recife - Pernambuco

2020

THAYNÁ ALICE BRITO ALMEIDA

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DA ADEQUAÇÃO E  
DISPONIBILIDADE DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS ALUVIAIS E DE REUSO PARA  
FINS AGRÍCOLAS 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

Co-orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup> Carlyne Wanessa Lins de Andrade Farias

Recife - Pernambuco

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal Rural de Pernambuco  
Sistema Integrado de Bibliotecas  
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- A447a Almeida, Thayná Alice Brito  
Avaliação experimental e numérica da adequação e disponibilidade de águas subterrâneas aluviais e de reuso para fins agrícolas no Semiárido / Thayná Alice Brito Almeida. - 2020.  
117 f. : il.
- Orientador: Abelardo Antonio de Assuncao Montenegro.  
Coorientadora: Carolyne Wanessa Lins de Andrade Farias.  
Inclui referências.
- Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Recife, 2020.
1. Mann Kendall. 2. Salinidade. 3. Reúso. 4. Geoestatística. I. Montenegro, Abelardo Antonio de Assuncao, orient. II. Farias, Carolyne Wanessa Lins de Andrade, coorient. III. Título

THAYNÁ ALICE BRITO ALMEIDA

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DA ADEQUAÇÃO E  
DISPONIBILIDADE DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS ALUVIAIS E DE REUSO PARA  
FINS AGRÍCOLAS 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 19/10/2020.

Orientador:

---

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

Examinadores:

---

Prof. Dr. Ênio Farias de França e Silva  
DEAGRI - UFRPE

---

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

*“Que darei eu ao Senhor, por todos os benefícios  
Que me tem feito?” (Salmos 116:12)*

*Dedico este trabalho aos meus amados  
pais Vanda Almeida e Dimas Almeida.  
Nada seria possível sem o apoio e amor  
incondicional de vocês. Dedico  
também, a minha tia Vilma Brito (in  
memorian). Levarei, por toda a vida, o  
seu exemplo de fé e força.*

## **Agradecimentos**

Um coração repleto de gratidão é o que carrego ao final deste mestrado. Agradeço a Deus, pelo seu amor e infinita graça. Por ter me concedido a vida e me capacitado, dia após dia. Aos meus pais Dimas Almeida e Vanda Almeida, meus grandes exemplos de vida, por todo incentivo, amor incondicional, por acreditarem tanto nos meus sonhos e serem tão presentes, me apoiando em absolutamente tudo.

Aos meus pais de coração Ednaldo Alves e Vânia Brito, por todo amor, carinho e incentivo. Aos meus irmãos Danyllo, Mayana e Gustavo pela parceria, e pelos maiores presentes da minha vida: Dimas Neto e Anthony, meus sobrinhos. A Yago por me ensinar todos os dias a ser alguém melhor. As minhas amigas Mariana Nascimento e Nadijane Melquiades, por todo o carinho, incentivo e por sempre acreditarem tanto em mim. Ao meu namorado, Raphael Lins, por todo companheirismo e compreensão desde a graduação.

Ao meu orientador, Abelardo Montenegro, por tudo, por ser um grande exemplo de dedicação, pela oportunidade, confiança, motivação e amizade construída ao longo desses 5 anos de parceria. A minha co-orientadora Carolyne Farias, pelos conselhos, dicas e disponibilidade. Aos agricultores do Assentamento Nossa Senhora do Rosário (Pesqueira), por acreditarem e participarem desse, e tantos outros projetos, em especial a Vivaldo, Malaquias (in memorian), Osmando, Dedé e Josa.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PGEA/ UFRPE), por todo o apoio e estrutura oferecidos. A todos os professores, alunos e funcionários. Aos irmãos científicos, recentes e antigos, do Laboratório de Água e Solo (LAS/UFRPE), que tornaram o dia a dia mais leve: Fred Mikhail, Liliane Pinheiro, Adriana Guedes, Cleene Lima, Adriano Normandia, Sonny, Frederico Lins, Iug Lopes, Aline Chagas, Hugo Montenegro, Kátia Ribeiro, Lizandra Soares, Moisés e Rodrigo. Meu agradecimento especial a Ailton Carvalho, Beatriz Gomes, Andeson Lima e Agnes Ramos por toda ajuda nos trabalhos de campo e de laboratório.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Pernambuco – FACEPE (Consórcio Universitas – APQ-0300-5.03/17), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Nível Superior – CAPES, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq e à FINEP (REHIDRO 1830), pelos apoios financeiro e institucional.

Finalmente, a todas as pessoas e instituições que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização desta pesquisa: muito obrigada.

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. 117f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil.

### **Resumo geral**

O convívio produtivo com a escassez hídrica é um desafio crescente, em particular no semiárido, seja devido a limitações de quantidade ou de qualidade das águas disponíveis. Esta Dissertação objetiva analisar a disponibilidade quantitativa e qualitativa de água no semiárido, dentro do contexto das mudanças climáticas, e avaliar o potencial e adequação de fontes alternativas de água para fins agrícolas. Duas fontes alternativas de água são investigadas neste estudo: as águas oriundas de aquíferos aluviais e as águas provenientes de efluentes domésticos tratados. A estabilidade temporal para piezometria e salinidade foi investigada através do Método das Diferenças Relativas, com base em rede de monitoramento de piezômetros e poços no vale aluvial da Bacia do Riacho Mimoso, sub-bacia do Alto Ipanema, Pesqueira-PE. A análise de tendência da potenciometria, salinidade e explorações das águas subterrâneas e de variáveis climáticas foram analisadas pelo método de Mann-Kendall, e as magnitudes pelo teste de Sen's Slope, para o período de 2000 a 2020. Os padrões de variabilidade espacial da condutividade elétrica e da razão de adsorção de sódio das águas subterrâneas, ao longo do tempo, foram investigados através da geoestatística, bem como a adequação para irrigação por meio de uma variável indicadora. A técnica geoestatística também foi empregada para avaliar a variabilidade espacial de atributos de solo e vegetal em parcelas experimentais cultivadas com milho irrigado com efluente doméstico tratado e aplicação de lodo de esgoto na unidade piloto experimental de reúso, em Pesqueira. Foi possível verificar a ocorrência de estabilidade temporal apenas para o nível potenciométrico, sendo possível identificar três piezômetros estáveis. Detectou-se a presença de tendências crescente para a evapotranspiração ( $5,74 \text{ mm}\cdot\text{ano}^{-1}$ ), exploração ( $4450 \text{ m}^3\cdot\text{ano}^{-1}$ ), temperatura média ( $0,09 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{ano}^{-1}$ ) e tendências decrescentes para a precipitação ( $-126 \text{ mm}\cdot\text{ano}^{-1}$ ) e nível de água no aquífero ( $-0,074 \text{ m}\cdot\text{ano}^{-1}$ ). A avaliação da qualidade da água e o mapeamento de variáveis indicadoras permitiram a identificação de áreas adequadas e inadequadas para o uso agrícola, com percentuais variando de 81,4 e 93,7% e 6,3 a 20,5%, respectivamente, ao longo do tempo. Essas variações estão atreladas ao uso agrícola do solo e as correlacionadas a

características naturais do aquífero, auxiliando na tomada de decisão sobre quando e onde irrigar. Além disso, o uso de água residuária tratada para cultivos agrícolas representou uma importante alternativa para a potencialização e manutenção da agricultura irrigada, no semiárido, proporcionando um maior crescimento vegetal, incremento na umidade e no teor de matéria orgânica do solo.

**Palavras-chave:** Mann Kendall, Salinidade, Reúso, Geoestatística

## General abstract

The productive coexistence with water scarcity is a growing challenge, particularly in the semiarid regions, either due to limitations in the quantity or quality of available water. This Dissertation aims to analyze the quantitative and qualitative availability of water resources in the semiarid region, within the context of climate change, and to evaluate the potential and suitability of alternative sources of water for agricultural purposes. Two alternative water sources are investigated in this study: waters from alluvial aquifers, often with moderate to high levels of salts, and waters from treated domestic effluents, which can also cause salts accumulation in the soil and in the environment. Temporal stability for piezometry and salinity was investigated using the Relative Differences Method, based on a monitoring network of piezometers and wells in the alluvial valley of the Mimoso rivulet Basin, Alto Ipanema sub-basin, located in Pesqueira-PE. Trend analysis of potentiometry, salinity and exploitation of groundwater and climatic variables in the region were analyzed by the Mann-Kendall method, and the magnitudes by the Sen's Slope test, for the period from 2000 to 2020. Spatial variability patterns of electrical conductivity and the sodium adsorption ratio of groundwater, over time, were identified through geostatistics, as well as the suitability for irrigation by means of an indicator variable. The geostatistical technique was also used to evaluate the spatial variability of soil and plant attributes in experimental plots cultivated with corn irrigated with treated domestic effluent and application of sewage sludge in the experimental pilot reuse unit in Pesqueira. It was possible to verify the occurrence of temporal stability for the potentiometric level only. Increasing trends for evapotranspiration ( $5.74 \text{ mm}\cdot\text{year}^{-1}$ ), exploitation ( $4450 \text{ m}^3\cdot\text{year}^{-1}$ ), mean temperature ( $0.09 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{year}^{-1}$ ) and decreasing trends for precipitation ( $-126 \text{ mm}\cdot\text{Year}^{-1}$ ) and for water level in the aquifer ( $-0.074 \text{ m}\cdot\text{year}^{-1}$ ). Evaluation of water quality and the mapping of indicator variables allowed the identification of suitable and unsuitable areas for agricultural use, with percentages ranging from 81.4 to 93.7% and 6.3 to 20.5%, respectively, over time. Such variations are linked to the agricultural use of the soil and those correlated to the natural characteristics of the aquifer, supporting decisions about when and where to irrigate. Besides that, the use of treated wastewater for agricultural crops represents an important alternative for the enhancement and maintenance of irrigated agriculture in the semiarid region, providing greater plant growth, and increasing soil moisture and soil organic matter content.

**Keywords:** Mann Kendall, Salinity, Reuse, Geostatistics

## Sumário

<b>Capítulo I</b> .....	16
1. Introdução.....	16
2.Hipóteses .....	18
3. Objetivos.....	18
3.1 Geral .....	18
3.2 Objetivos Específicos .....	18
4. Fundamentação Teórica.....	19
4.1 Águas Subterrâneas e a sua importância para semiárido.....	19
4.4 Qualidade da água subterrânea para fins agrícolas no semiárido .....	20
4.2 Estudo da estabilidade temporal aplicada a dinâmica hidro-salina de aquíferos .....	22
4.3 Efeito das mudanças climáticas nos recursos subterrâneos e no abastecimento hídrico futuro da região semiárida .....	23
4.5 Análise de Tendência.....	24
4.6 Reúso .....	25
4.7 Geoestatística.....	26
Referências .....	27
<b>Capítulo II</b> .....	34
Resumo .....	34
Abstract.....	36
1. Introdução.....	38
2. Material e métodos .....	40
2.1 Área de Estudo.....	40
2.2 Coleta de dados.....	42
2.3 Estimativa das vazões bombeadas nos poços e nos lotes irrigados.....	43
2.4 Estabilidade Temporal .....	45
2.5 Análise de tendência.....	46
3. Resultados e discussão.....	48
3.1 Dinâmica hidrossalina do aquífero .....	48
3.2 Vazão de Extração .....	
3.3 Estabilidade temporal .....	51

3.4 Análise da tendência mensal e anual .....	58
4. Conclusões.....	64
Referências .....	64
<b>Capítulo III.....</b>	<b>69</b>
Resumo .....	69
Abstract.....	71
1. Introdução.....	73
2. Material e Métodos.....	75
2.1 Área de Estudo.....	75
2.2 Determinação da Salinidade e Sodicidade.....	76
2.3 Análise Estatística e Geoestatística .....	78
3. Resultados e discussão.....	80
3.1 Análise climática .....	80
3.2 Avaliação dos cátions solúveis .....	83
3.3 Análise geoestatística .....	87
4. Conclusões.....	95
Referências .....	95
<b>CAPÍTULO IV.....</b>	<b>99</b>
Resumo .....	99
Abstract.....	100
1. Introdução.....	101
2. Material e métodos .....	102
2.1 Área de estudo .....	102
2.2 Análise estatística e Geoestatística .....	104
3. Resultados e discussão.....	105
4. Conclusões.....	113
Referências .....	113
<b>CAPÍTULO V .....</b>	<b>117</b>
Conclusões Gerais .....	117

## Lista de Figuras

### CAPÍTULO II

Figura 1. Mapa de localização do vale aluvial do Riacho Mimoso, bacia do Alto Ipanema, município de Pesqueira-PE.....	41
Figura 2. Mapa da classificação pedológica da área em estudo (Correa & Ribeiro, 2001) e localização dos piezômetros.....	42
Figura 3. Série temporal média mensal dos níveis potenciométricos, CE (condutividade elétrica) e precipitação no vale aluvial Riacho do Mimoso.....	48
Figura 4. Box-plot das médias mensais do nível potenciométrico (A) e da CE (B) ao longo para os anos de 2000 a 2019.....	49
Figura 5. Vazão de extração, evapotranspiração de referência e precipitação de 2000 a 2019 na Fazenda Nossa Senhora do Rosário.....	50
Figura 6. Diferença média relativa e desvio-padrão temporal para o nível potenciométrico (A) e condutividade elétrica (B).....	52
Figura 7. Correlação entre os dados dos piezômetros estáveis e a média dos demais piezômetros no vale aluvial do Riacho Mimoso e Comparação entre os valores médios de nível de água no aquífero e o ponto estável Pz 3.8 (B), Pz 3.11b (D), Pz 3.11h (F), Pz3.11k (H).....	54
Figura 8. Correlação entre a condutividade elétrica dos piezômetros Pz 2.1 (A), Pz 3.11a (B), Pz 3.8 (C), Pz 4.0 (D) e a média dos demais piezômetros e Comparação entre a série de valores médios da condutividade elétrica da água subterrânea e a série dos pontos Pz 3.1(A), Pz 3.11a(B), Pz 3.8(C) e Pz 4.0 (D).....	55
Figura 9. Box-plot do nível de água (A) e condutividade elétrica (B) para os piezômetros avaliados.....	58
Figura 10. Séries temporais anuais de temperatura máxima (A), mínima (B) e média (C) no período de 2000 a 2019, com a linha de tendência associada.....	61
Figura 11. Séries temporais anuais de chuvas (A) e evapotranspiração de referência (B) no período de 2000 a 2019, com a linha de tendência associada.....	61
Figura 12. Séries temporais anuais e linha de tendência associada do nível de água subterrânea nos piezômetros Pz 3.11b (A), Pz 3.11h (B), Pz 3.11k (C), Pz 3.8 (D); e da	

salinidade nos piezômetros Pz 2.1 (E), Pz 3.11a (F), Pz 4.0 (G), Pz 3.8 (H), para o período de 2000 a 2019.....	62
Figura 13. Séries temporais anuais e linha de tendência associada das médias gerais do nível de água subterrânea (A) e da condutividade elétrica (B) e vazão de extração (C) para o período de 2000 a 2019.....	63

### **CAPÍTULO III**

Figura 1. Box-plot da condutividade elétrica para todos os meses de 2019, após a filtragem dos valores extremos, no Vale aluvial do Mimoso, Pesqueira-PE.....	82
Figura 2. Semivariogramas escalonados pelas variâncias da CE e ajustes dos modelos exponencial, gaussiano e esférico, para os meses de janeiro (A) a dezembro (M) de 2019. C0 representa o efeito pepita, C0 + C1 o patamar e A o alcance do modelo.....	87
Figura 3. Semivariogramas escalonados pelas variâncias da RAS e ajustes dos modelos exponencial, gaussiano e esférico, para os meses de maio a novembro de 2019. C0 representa o efeito pepita, C0 + C1 o patamar e A o alcance do modelo.....	89
Figura 4. Semivariogramas cruzados RAS X CE e ajustes dos modelos exponencial, gaussiano e esférico, para os meses de maio a novembro de 2019. C0 representa o efeito pepita, C0 + C1 o patamar e A o alcance do modelo.....	90
Figura 5. Mapas de krigagem da CE para os meses de janeiro (A), fevereiro (B), março (C), abril (D), maio (E), junho (F), julho (G), agosto (H), setembro (I), outubro (J), novembro (L) e dezembro (M) de 2019.....	91
Figura 6. Mapas de krigagem Razão de Adsorção de Sódio (RAS) para os meses de maio (A), junho (B), julho (C), agosto (D), setembro (E), outubro (F) e novembro (G) de 2019.....	92
Figura 7. Semivariogramas dos indicadores de adequação da água subterrânea e ajustes dos modelos exponencial, gaussiano e esférico, para os meses de maio (A); junho (B); julho (C); agosto (D); setembro (E); outubro (F); novembro (G) de 2019.....	93
Figura 8. Mapas de krigagem da qualidade da água subterrânea para fins de irrigação para os meses de maio (A); junho (B); julho (C); agosto (D); setembro (E); outubro (F); novembro (G) de 2019.....	94

### **CAPÍTULO IV**

Figura 1. Mapa da localização da unidade de tratamento de esgoto localizada da Bacia do Rio Ipojuca, no município de Pesqueira, Pernambuco, Brasil.....	102
---	-----

Figura 2. Box plots para umidade do solo (A), condutividade elétrica (B), matéria orgânica (C), sódio (D), potássio (E), areia (F), argila (G), altura do vegetal (H), diâmetro colmo (I) e número de folhas (J), para o tratamento SL e CL.....	106
Figura 3. Semivariogramas experimentais e teóricos em escala para a umidade gravimétrica (g g <sup>-1</sup> ) (a); condutividade elétrica (dS m <sup>-1</sup> ) (B); matéria orgânica (g kg <sup>-1</sup> ) (C); sódio (cmol kg <sup>-1</sup> ) (D); potássio (cmol kg <sup>-1</sup> ) (E); teor de areia (g.Kg <sup>-1</sup> ) (F); teor de argila (g.Kg <sup>-1</sup> ) (G); altura do vegetal (m) (H); diâmetro (mm) (I) e número de folhas (J).....	110
Figura 4. Semivariogramas experimentais e teóricos em escala para a umidade gravimétrica - UG – umidade gravimétrica (g g <sup>-1</sup> ); CE – condutividade elétrica (dS m <sup>-1</sup> ); MO – matéria orgânica (g kg <sup>-1</sup> ); Na – sódio (cmol kg <sup>-1</sup> ); K- potássio (cmol kg <sup>-1</sup> ); ARE- teor de areia (g Kg <sup>-1</sup> ); ARG- teor de argila (g kg <sup>-1</sup> ).....	112

## Lista de tabelas

### **CAPÍTULO II**

Tabela 1. Coeficiente das principais cultura das culturas irrigadas no Vale Aluvial.....	44
Tabela 2. Desempenho da estabilidade dos piezômetros pelo Índice de Willmott.....	57
Tabela 3. Análise de tendência (indicada por setas) e declives dos níveis dos piezômetros (m mês-1), da condutividade elétrica (dS m-1), precipitação (mm mês-1), temperatura máxima, mínima e média (°C mês-1), evapotranspiração de referência (mm mês-1) e vazão de extração (m <sup>3</sup> mês-1).....	59

### **CAPÍTULO III**

Tabela 1. Classificação da água conforme Richards (1954).....	78
Tabela 2. Médias mensais históricas e para o ano de 2019 dos dados meteorológicos, vazão média de exploração de água e medidas estatísticas para a condutividade elétrica (CE).....	81
Tabela 3. Estatística descritiva mensal dos parâmetros químicos da água subterrânea no vale aluvial do Mimoso	84
Tabela 4. Correlação de Spearman entre os teores de sais, condutividade elétrica (CE) e razão de adsorção de sódio (RAS) para os meses de maio a novembro de 2019.....	86

### **CAPÍTULO IV**

Tabela 1. Avaliação inicial dos atributos químicos do efluente doméstico tratado utilizado ao longo do período experimental e do logo aplicado no tratamento.....	103
Tabela 2. Estatísticas clássicas das variáveis observadas no desenvolvimento do milho, para o tratamento sem lodo (SL) e com lodo (CL).....	107

## CAPÍTULO I

---

### 1 INTRODUÇÃO

Os recursos hídricos são de suma importância econômica e estratégica para o desenvolvimento regional. A gestão de recursos hídricos envolve o conjunto de procedimentos organizados no sentido de solucionar ou evitar os problemas referentes ao uso e ao controle da água disponível (OTOCH et al., 2019). Assim, essa gestão e planejamento dependem de uma adequada quantificação da disponibilidade hídrica. Segundo Monte-Mor (2012), a gestão racional da água deve ser fundamentada sobre uma profunda compreensão da disponibilidade de água em movimento na atmosfera e em ciclo na bacia hidrográfica, a qual é uma questão complexa e crucial para o desenvolvimento de uma região.

Em regiões semiáridas, existe uma grande preocupação acerca da disponibilidade e qualidade dos recursos hídricos a longo prazo. Essa preocupação se agrava em consequência dos efeitos crescentes de alterações no clima, associados à reduzida disponibilidade, seja quantitativa ou qualitativa, de água superficial e subterrânea (GEHYI et al., 2012). Fontes Júnior e Montenegro (2017) destacam que a incerteza das chuvas e a ocorrência de secas nas regiões semiáridas, associadas às altas taxas de evapotranspiração, limitam fortemente a disponibilidade de recursos hídricos, tanto em reservatórios superficiais quanto em aquíferos rasos.

A águas subterrâneas aluviais desempenham um papel fundamental no suporte à agricultura irrigada de pequena escala, bem como no abastecimento de famílias, povoados e cidades nos períodos de estiagem (FONTES JÚNIOR et al., 2012). A agricultura depende principalmente da água subterrânea em regiões semiáridas, no entanto, o uso irrestrito está causando esgotamento na reserva hídrica dos aquíferos e na qualidade da água (Patel et al., 2020). A captação excessiva de água subterrânea nas últimas décadas causou sérios problemas. Além disso, as mudanças climáticas futuras e a variabilidade temporal da disponibilidade de água podem causar a deterioração da qualidade da água subterrânea e aumentar a profundidade dos lençóis freáticos (FARID et al., 2019).

Para os aspectos de gestão dos recursos hídricos subterrâneos, a previsão da tendência com a precisão desejada é essencial para seu uso sustentável (HASDA et al., 2020). Um dos procedimentos que vem sendo largamente utilizado é o teste de tendência de Mann-Kendall

(MK) ((MANN (1945); KENDALL (1975)), juntamente ao estimador de declive de Sen's slope (SEN, 1968), capaz de identificar a presença, o declive e magnitude de uma tendência linear. O teste MK foi utilizado por Moghazy e Kaluarachchi (2020) para avaliar a eficiência do uso da água subterrânea do aquífero Núbio, no Egito, e os possíveis impactos na qualidade deste recurso. O teste também foi utilizado por Gribila (2018) para investigar o impacto das mudanças climáticas e das atividades antropogênicas na disponibilidade de água subterrânea na África, através da avaliação de uma série de dados piezométricas. Del-Toro Guerrero e Kretzschmar (2020) e Peña Arancibia et al. (2020) avaliaram através do MK as tendências e magnitudes em séries temporais climáticas no México e em Bangladesh, respectivamente. Carvalho et al. (2020) utilizaram o teste de MK para analisar tendências no regime de chuvas, número de dias chuvosos e temperatura para estações localizadas em diferentes condições de continentalidade e altitude no Nordeste do Brasil.

No tocante a disponibilidade qualitativa dos recursos subterrâneos, a qualidade da água de irrigação depende de vários tipos de sais que constituem a salinidade e a sodicidade da água, que por sua vez são influenciados principalmente pela química dos minerais formadores de rocha dos aquíferos, transformação da matéria orgânica, processos geológicos no aquífero e atividades antropogênicas (YANG et al., 2016). Para estabelecer a distribuição espacial dos parâmetros de qualidade da água subterrânea, muitos autores têm utilizado o método geoestatístico, que se constitui em uma metodologia poderosa de interpolação, permitindo o mapeamento de atributos e variáveis em diferentes ramos da ciência (BOUFEKANE; SAIGHI, 2019).

Uma estratégia que vem ganhando destaque na busca para melhor conviver com a escassez hídrica é o reúso de água. Segundo Carvalho et al. (2020b), o reúso agrícola deve ser incentivado nas comunidades rurais e urbanas, e deve ser incorporado como estratégia essencial em diferentes níveis de atuação, tornando-se um dos instrumentos necessários para garantir sustentabilidade hídrica no semiárido. Para Dornelles et al. (2017), os resíduos orgânicos são excelentes fontes de nutrientes e sua incorporação na agricultura pode trazer benefícios para a qualidade física, química e biológica do solo. Entretanto, apesar do fornecimento de nutrientes, o efluente tratado apresenta riscos de salinização e sodificação, que podem comprometer a qualidade agrônômica do solo (BARBOSA et al., 2018). Desse modo, para se obter um maior rendimento na produção agrícola, torna-se necessário o

conhecimento sobre a variabilidade espacial das culturas e atributos do solo, possibilitando determinar zonas de manejo específicas (BUSS et al., 2019).

## **2 HIPÓTESES**

- É possível identificar áreas representativas da dinâmica hidrossalina média em aquífero aluvial;
- Os níveis potenciométricos do lençol freático em aquíferos aluviais apresentam um padrão de variabilidade temporal e estão correlacionados com variações climáticas de precipitação e evapotranspiração;
- A salinidade, nível de água e precipitação possuem tendência temporal de alteração de longo prazo;
- A utilização de água residuária tratada via irrigação, e a aplicação do lodo de esgoto no solo possibilita adequada produção agrícola no semiárido;
- A utilização de água residuária tratada via irrigação, e a aplicação do lodo de esgoto no solo não apresentam efeitos deletérios ao solo.

## **3 OBJETIVOS**

### **3.1 Geral**

Analisar a disponibilidade quantitativa e qualitativa de água no semiárido, dentro do contexto das mudanças climáticas, e avaliar o potencial e adequação de fontes alternativas de água para fins agrícolas.

### **3.2 Objetivos Específicos**

- Identificar pontos estáveis e representativos da potencimetria e salinidade dentro de uma malha piezométrica em vale aluvial intensamente monitorado;
- Identificar tendências de longo prazo nos níveis de água subterrânea, salinidade e a precipitação em vale aluvial representativo e sua magnitude;
- Analisar a dinâmica espaço-temporal da salinidade das águas subterrâneas em um vale aluvial no semiárido;
- Mapear a distribuição espacial de salinidade e sodicidade, ao longo do tempo, criando uma variável indicadora de adequação das águas subterrâneas para uso agrícola;

- Mapear variáveis físicas, químicas e biológicas do solo e variáveis biométricas de um cultivo agrícola sob manejo de irrigação com efluente doméstico tratado e aplicação de lodo de esgoto.

## **4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **4.1 Águas Subterrâneas e a sua importância para semiárido**

As águas subterrâneas são um recurso importante para o abastecimento público e agrícola, que está interligado com outros componentes do ciclo hidrológico e, portanto, reabastecido pela infiltração oriunda de precipitações, lixiviações ou águas superficiais (HAAS; BIRK, 2019). Em muitas partes do mundo, este recurso é frequentemente considerado como a única fonte hídrica perene disponível, especialmente em regiões áridas e semiáridas, onde desempenha um papel importante no abastecimento de famílias e cidades durante a estação seca (COELHO et al., 2017).

Na região semiárida, o clima que se estende por grandes porções dessa área, causa déficits hídricos extremos por causa das baixas chuvas e alta evapotranspiração (Montenegro e Ragab, 2010). A região depende fortemente da exploração de aquíferos aluviais para atender à demanda de populações dispersas e às práticas de irrigação em pequena escala, devido ao déficit hídrico existente na maior parte do ano. Entretanto, esses aluviões são susceptíveis ao acúmulo de sais, tanto na zona não-saturada quanto na saturada, a depender, dentre outros fatores, da distribuição espacial de suas características hidráulicas (MONTENEGRO; MONTENEGRO, 2006; MONTEIRO et al., 2014).

Apesar das vantagens na utilização das águas dos vales aluviais no semiárido, esse recurso é limitado e apresentou nas últimas décadas degradações qualitativas e quantitativas causadas por impactos antrópicos (superexploração e poluição) e naturais (tipo de clima e aquecimento global) (BAHIR et al., 2020). O ponto principal na exploração de águas subterrâneas está no balanço hídrico desse recurso, que deve promover um equilíbrio entre a taxa de recarga e de extração. Isso pode resultar na exploração de partes das reservas permanentes do aquífero com risco de exaustão, quando a retirada não é monitorada nem gerida adequadamente (ALBUQUERQUE et al., 2015).

Explorações excessivas de água subterrânea para fins agrícolas nas últimas décadas causaram sérios problemas. Ribeiro et al. (2015), avaliando uma rede piezométricas em

aquíferos aluviais do baixo de Elqui, Chile, constataram que o desenvolvimento da irrigação gerou fluxos de retorno, induzindo mudanças quantitativas e qualitativas sobre as águas subterrâneas, e que um aumento na eficiência dos sistemas de irrigação implica em modificar a recarga do aquífero e alterar seu equilíbrio. O aumento do bombeamento de aquíferos pode levar ao seu esgotamento, que por sua vez afeta a relação rio-aquífero. Além do aumento observado no uso das águas subterrâneas, Penã-Arancibia et al. (2020) ressaltam o impacto das mudanças climáticas na redução das chuvas e as mudanças nas condições da superfície, que afetam os processos de escoamento e infiltração, que são cruciais para a recarga dos aquíferos. Os déficits hídricos, provocados pelas variações climáticas, podem reduzir a infiltração de água, e assim também ameaçar a sustentabilidade dos aquíferos (COELHO et al., 2017).

A disponibilidade dos recursos hídricos subterrâneos no semiárido está intimamente relacionada à prosperidade econômica de uma área (TZIRITIS et al., 2016). Desta forma, é essencial o conhecimento sobre a qualidade e quantidade destas águas, os fatores naturais ou antrópicos que podem interferir em sua qualidade, bem como seus efeitos sobre o solo e os cultivos, visando a sustentabilidade e o desenvolvimento ambiental.

#### **4.2 Qualidade da água subterrânea para fins agrícolas no semiárido**

Um entendimento completo da dinâmica hidro-salina das águas subterrâneas é fundamental para proteger os recursos hídricos subterrâneos sob condições de mudança climática e aumento de pressões antrópicas (ZANG et al., 2020). Para Panzand et al. (2018), é evidente que a questão da qualidade da água subterrânea é tão importante quanto a quantidade de água subterrânea para satisfazer as necessidades hídricas.

A avaliação da qualidade da água tem uma implicação importante para o potencial da água subterrânea como recurso, e pode indicar onde os impactos negativos podem ser mitigados, além de realizar um esquema de avaliação para o programa de conservação de água (SLAMA; SEBEI, 2020). Reddy et al. (2019) constataram que a qualidade das águas subterrâneas varia no espaço e no tempo (período sazonal), além de sofrer influência da profundidade do aquífero e tipo da rocha presente na área. Kumar et al. (2007) também corroboram sobre a interferência das variáveis de espaço e tempo sobre a qualidade destas águas, ao tempo que retratam a importância de acompanhar sua variação, visto que de posse

dessas informações é possível definir padrões de uso e evitar problemas que surgem a partir do manejo inadequado das águas de irrigação.

A qualidade das águas é influenciada por fatores de origem natural e antropogênica, em que seus constituintes podem atuar de forma individual ou conjunta para deterioração da água. A principal fonte natural que influencia na qualidade das águas subterrâneas é a composição mineral da rocha de origem (KHALID, 2019). Outros processos naturais são o intemperismo das rochas e solo, processos atmosféricos que envolvem a evapotranspiração, lixiviação da matéria orgânica e nutrientes presentes na zona vadosa, além dos eventos de precipitação, dissolução mineral, recargas naturais, interação água-rocha (ABDEL-SATAR et al., 2017)

Dentre os fatores antrópicos que podem afetar a qualidade das águas, destacam-se a mudança de uso e ocupação do solo, bem como os despejos inadequados de efluentes urbanos (SAMANTARA et al., 2017; KAWO; KARUPPANNAN, 2018). Outra prática que pode conduzir à contaminação destas águas é a agricultura, devido ao uso extensivo de produtos químicos (ELTARABILY et al., 2018), já que os resíduos de pesticidas, inseticidas e fertilizantes em grande quantidade alteram as características químicas das águas.

O monitoramento da salinidade da água é extremamente importante do ponto de vista agrícola e ambiental, já que as culturas têm dificuldade em absorver e extrair água sob alta salinidade do solo. Do ponto de vista analítico, a abordagem da variabilidade espacial e temporal pode ser eficiente para descrever e analisar o real quadro hidroquímico das águas subterrâneas (HUANG et al., 2018). A identificação de tal variabilidade fornece informações essenciais a uma adequada gestão, e estratégias de proteção à poluição natural e antropogênica.

A classificação das águas subterrâneas é realizada usando diferentes procedimentos e índices. A condutividade elétrica (CE) é o indicador mais utilizado do grau de salinidade, e junto a ela a razão de adsorção de sódio (RAS) é o indicador mais utilizado para avaliar a adequação da água para a irrigação. A RAS é um índice importante que se refere à qualidade da água para a prática de irrigação, pois mede o grau em que o sódio da água de irrigação substitui o cálcio e o magnésio do solo, prejudicando a estrutura do solo (BOUFEKANE; SAIGH, 2019), enquanto que a CE indica a quantidade total de íons dissolvidos na água (DELBARI et al., 2016).

O gerenciamento eficaz e a sustentabilidade da água exigem que as variações espaciais na qualidade das águas subterrâneas e seus fatores de controle sejam compreendidas (MASOUD et al., 2018). Entretanto, entender os padrões espaciais e temporais da geoquímica das águas subterrâneas em escala regional por um longo período é um desafio, devido à falta de dados e abordagens estatísticas eficazes para caracterizar processos naturais complexos e atividades antropogênicas (YANG et al., 2020).

#### **4.2 Estudo da estabilidade temporal aplicada a dinâmica hidro-salina de aquíferos**

O monitoramento e a interpretação da potenciometria e da salinidade das águas subterrâneas nas regiões semiáridas contribuem para o desenvolvimento da irrigação, sendo relevantes para sustentabilidade local (MACKAY et al., 2006). Entretanto, o monitoramento sistemático e distribuído é um procedimento oneroso justificando a investigação e a aplicação de técnicas que possibilitem a identificação de locais representativos da área de interesse (FONTES JÚNIOR et al., 2012).

Neste aspecto, Vachaud et al. (1985) propuseram uma metodologia que associa a estabilidade no tempo entre locações espaciais e valores estatísticos paramétricos clássicos, e pode ser considerada uma referência para estudos de estabilidade temporal. Em sua pesquisa, foi proposto um método para reduzir o número de observações necessárias para a caracterização de uma determinada propriedade física do solo. Os autores apresentaram a técnica de diferenças relativas, em que são realizadas análises dos desvios entre os valores individualmente observados e o valor médio de todas as observações. Como resultado, pequenas variações nas diferenças relativas entre as posições espaciais (em função do tempo) indicam estabilidade temporal.

A estabilidade temporal pode ser uma abordagem eficaz para estratificar uma rede de monitoramento hidrológica de longo prazo. Ran et al. (2015) aplicaram a técnica de estabilidade temporal a uma rede de monitoramento de água subterrânea. Os autores basearam o estudo na suposição de que os padrões espaciais do nível do lençol freático tendem a persistir ao longo do tempo em uma paisagem e estrutura geológica particulares. Segundo os autores, a estabilidade temporal do nível do lençol freático pode ser dominada pela estabilidade de muitos fatores ambientais, combinados naturalmente e respeitando a heterogeneidade espacial do nível do lençol freático durante um longo período. Fontes Júnior et al. (2012) também aplicaram a referida metodologia ao monitoramento de níveis

potenciométricos e a salinidade das águas subterrâneas do vale aluvial do Mimoso, com base em uma rede piezométrica de monitoramento, e constataram que apenas as medições de níveis mensais podiam ser adequadamente representadas temporalmente por pontos estáveis, não tendo sido possível identificar locações representativas da variabilidade espaço temporal da salinidade.

### **4.3 Efeito das mudanças climáticas nos recursos subterrâneos e no abastecimento hídrico futuro da região semiárida**

A seca é um risco natural recorrente, que pode ocorrer em qualquer região climática. Os efeitos da seca não se limitam apenas às crises regionais da água, mas podem levar a importantes consequências sociais, econômicas e ambientais (VAZIFEHKHAH; KAHYA, 2019). Devido às mudanças climáticas, espera-se que as secas ocorram com mais frequência e com maior intensidade (YACOUB; TAYFUR, 2020). Desta forma, os efeitos da variabilidade climática sobre os recursos hídricos têm sido objeto de estudos críticos para a melhoria da gestão da água em escala local (VELASCO et al., 2017).

No Nordeste brasileiro, historicamente as secas registradas são desde de um período curto de um ano, até mais de sete anos consecutivos, que ao longo da história tem ocasionado diversas mortes de pessoas e animais. Entretanto, estes eventos vêm sendo intensificados nos últimos anos, levando à investigação em relação aos efeitos das mudanças climáticas.

O Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados - Fase 5 (CMIP5) desenvolveu quatro cenários de mudanças climáticas, os quais representam quatro níveis de forças radiativas naturais e antropogênicas emitidas até o final do século 21, chamadas Vias de Concentração Representativas (RCPs). As RCPs caracterizam as mudanças nas entradas e saídas de radiação para a atmosfera, causadas por modificações nos elementos atmosféricos, como por exemplo, o dióxido de carbono (Moss et al., 2010). A RCP 2.6 representa um nível de força radioativa baixo (até  $2,6 \text{ Wm}^{-2}$ ), as RCPs 4.5 e 6.0 representam cenários de estabilização média ( $4,5$  e  $6,0 \text{ Wm}^{-2}$ ), enquanto que a RCP 8.5 consiste em um cenário de emissão elevada ( $8,5 \text{ Wm}^{-2}$ ) (MEINSHAUSEN et al., 2011; VUUREN et al., 2011; TAYLOR et al., 2012; TAN et al., 2017). Tais cenários também indicam aumentos na temperatura atmosférica até 2100, como por exemplo aquecimentos ente  $1,1$  e  $2,6 \text{ }^\circ\text{C}$  na RCP 4.5 e entre  $2,6$  e  $4,8 \text{ }^\circ\text{C}$  na RCP 8.5 (IPCC, 2013).

Segundo Tesfaye et al. (2019), o efeito combinado das mudanças nos padrões de precipitação com o aumento das temperaturas pode influenciar negativamente a disponibilidade hídrica e aumentar a ocorrência de secas. Como resultado, os recursos hídricos podem ser temporariamente estressados em algumas regiões, por exemplo, sob condições de seca, e futuras mudanças no clima, uso da terra e gestão da água potencialmente podem ter efeitos adversos tanto na reposição quanto na exploração dos recursos hídricos subterrâneos, agravando o estresse hídrico. Para mitigar os impactos hidrológicos e usar os recursos hídricos de forma sustentável, é importante entender as consequências da variabilidade do clima nas respostas hidrológicas.

#### **4.5 Análise estatística de Tendência**

Desde duas a três décadas, as definições de tendências têm recebido considerável interesse em séries temporais meteorológicas, hidrológicas, qualidade do ar e da água. O impacto de fatores climáticos e antropogênicos evidencia que as flutuações de variadas magnitudes sobre o clima podem afetar os níveis de água dos rios e aquíferos, tanto local quanto regionalmente (RIBEIRO et al., 2015). Para os aspectos de gestão dos recursos hídricos, a previsão da tendência com a precisão desejada é necessária para seu gerenciamento e uso sustentável (HASDA et al., 2020). Uma forma de detectar a ocorrência de mudanças climáticas em determinada região é por meio da avaliação de séries históricas de precipitação e temperatura, permitindo avaliar as possíveis consequências para a sociedade (SILVA et al., 2017).

Existem diferentes metodologias para identificação de tendências, entre as quais o Teste de Mann-Kendall (MK) (MANN, 1945; KENDALL, 1975) e a inclinação de Sen (SEN, 1968). O teste de tendência não paramétrico de Mann-Kendall, endossado pela organização meteorológica mundial, é o método mais comumente utilizado no reconhecimento de tendências em diferentes variáveis hidroclimáticas de longo prazo. Baseia-se na hipótese nula ( $H_0$ ) em que os dados se apresentam identicamente distribuídos (ausência de tendência) e na hipótese alternativa ( $H_A$ ) em que os dados seguem uma tendência monotônica na série temporal. O teste confirma a existência de uma tendência positiva ou negativa de acordo com a estatística do teste S para um determinado nível de confiança (XU et al., 2018). O teste Mann-Kendall é frequentemente usado com o método Sen para estimar a magnitude de uma tendência aparente (GUÇLU, 2020).

Na hidrologia, o teste MK vem sendo utilizado para avaliar a eficiência do uso da água subterrânea e impactos decorrentes do aumento da condutividade elétrica na produtividade agrícola (MOGHAZY; KALUARACHCHI, 2020); para avaliar as tendências de variabilidade sazonal nas séries piezométricas de longo prazo, e compreender os impactos da mudança climática e impactos antropogênicos (HU et al., 2019); para identificar mudanças temporais de longo prazo na precipitação, temperatura, precipitação e eventos de chuva (DEL-TORO GUERRERO; KRETZSCHMAR, 2020; Carvalho et al., 2020a) e para compreender o impacto das mudanças climáticas e da área de cultivo nos níveis de água subterrânea e as implicações para o uso sustentável da água subterrânea (PEÑA ARANCIBIA et al., 2020).

#### **4.6 Reúso hidroagrícola**

Uma estratégia para minimizar a escassez qualitativa e quantitativa de recursos hídricos, na região semiárida, para produção agrícola é o uso de água residuária, possibilitando atividade agropecuária mesmo em situação de secas, que por sua vez, estão mais recorrentes. A utilização de águas residuárias tratadas pode garantir disponibilidade hídrica para a agricultura irrigada, destinando a água de boa qualidade para usos mais nobres (POHL; LENZ, 2017).

O uso de efluentes tratados na agricultura irrigada vem sendo considerado uma alternativa essencial para uso eficiente da água, além de garantir a sustentabilidade dos sistemas ambientais, já que minimiza o volume de efluentes descarregados nos corpos hídricos (CARVALHO et al., 2020b). Entretanto, Cavalcante et al. (2016) destacam a importância do acompanhamento e monitoramento da qualidade do solo e da água, para evitar a salinização e a inviabilização das áreas de cultivo com o uso de efluentes domésticos tratados.

O manejo inadequado da aplicação dos efluentes domésticos na irrigação pode resultar em diversos impactos ambientais, como a lixiviação de sais para as águas subterrâneas e salinização do solo (LIRA et al., 2015; BATISTA et al., 2017). O descarte incorreto de efluentes doméstico tratados no solo aumenta a disponibilidade de nutrientes, e as concentrações de sais, elevando a condutividade elétrica do solo e reduzindo a capacidade das plantas em absorver água e nutrientes, o que acaba causando impactos negativos em fatores microbiológicos, como redução do estoque de carbono, e compromete a qualidade produtiva do solo (BARBOSA et al., 2018).

Desta forma, é necessário identificar a viabilidade do uso da água residuária na irrigação quanto da salinização do solo e da água do lençol freático. Segundo Montenegro et al. (2013), a qualidade do solo e do lençol freático quanto à salinidade deve ser monitorada para um adequado gerenciamento agroambiental, uma vez que a expansão da agricultura irrigada provoca um elevado consumo de água, aumentando o risco de degradação dos recursos naturais disponíveis.

#### **4.7 Geoestatística**

A geoestatística é definida como uma seção da estatística, que lida com avaliações espaciais ou espaço-temporais. É baseado na teoria do estudo de variáveis regionalizadas (CAY;UYAN, 2009). Tem sido uma ferramenta eficaz para mapear variações espaciais nas químicas da água e do solo. A aplicação desse método pode ajudar a prevenir e mitigar eficientemente problemas ambientais em regiões áridas e semiáridas (BERTIN et al., 2017).

Essa técnica utiliza o semivariograma como forma de caracterizar as relações estatísticas de covariâncias entre amostras no espaço e no tempo, ou melhor, a esperança matemática do quadrado das diferenças entre os valores de pontos no espaço ou no tempo, separados por uma distância  $h$  ou um intervalo de tempo  $t$  (ANDRIOTTI, 2003). A técnica considera que os valores da variável estão relacionados à sua disposição espacial e, portanto, as observações tomadas a curta distância se assemelham mais do que aquelas tomadas a distâncias maiores (LANDIM, 2003).

A principal vantagem da geoestatística é a possibilidade de construção de mapas de alta precisão a partir de técnicas de interpolação, permitindo que seja conhecida a distribuição de uma determinada variável na área de estudo. Entre essas técnicas, destaca-se a Krigagem, que segundo Bouferkani e Saighi (2019) é delineado como um estimador de inserção específico para procurar a estimativa linear não enviesada mais adequada. Destaca-se também o método de ponderação do inverso da distância, que consiste em calcular o valor de uma variável com base na média dos vizinhos em uma determinada área (KARANDISH; SHAHNAZARI, 2014). Assim, as distâncias inversas de um ponto desconhecido são consideradas como o peso. A aplicação desses métodos facilita a compreensão da dinâmica do fenômeno e facilita a tomada de decisões, com a adoção de medidas diferentes para cada localização mapeada, dependendo da distribuição espacial da variável.

Nos últimos anos, vários estudos vêm sendo realizados com o intuito de estudar a distribuição espacial de atributos hidrológicos em áreas agrícolas e em bacias hidrográficas, além de parâmetros relacionados a disponibilidade e qualidade da água e do solo. Delbari et al. (2016), aplicando o método geoestatístico e a krigagem indicadora, investigaram a variabilidade espacial dos parâmetros de qualidade da água subterrânea, identificando as áreas mais adequadas para implantação de sistemas de irrigação, em termos de qualidade da água, no sul do Irã. Farid et al. (2020) utilizaram o teste não paramétrico de Mann-Kendall e a geoestatística para avaliar as variações espaciais e temporais nos parâmetros de qualidade da água subterrânea em função das abstrações e mudanças climáticas, durante um período prolongado, no Paquistão. Carvalho et al. (2019) utilizaram a geoestatística e a interpolação por meio da krigagem para avaliar a variabilidade espacial da produtividade do milho, com base nos atributos físicos do solo e no crescimento e produtividade das plantas, em regime de sequeiro na presença e ausência de cobertura morta no semiárido brasileiro. E recentemente, Carvalho et al. (2020b) avaliaram viabilidade de cultivos agrícolas com reúso de efluente doméstico tratado, associado a práticas conservacionistas de água e solo para o semiárido através da técnica geoestatística e krigagem, no semiárido pernambucano.

## REFERÊNCIAS

- Abdel-Satar, A. M.; Al-Khabbas, M.H.; Alahmad, W.R.; Yousef, W.M.; Alsomadi, R.H.; Iqbal, T. Quality assessment of groundwater and agricultural soil in Hail region, Saudi Arabia. **Egyptian Journal of Aquatic Research**, v.43, n.1, p.55–64, 2017.
- Albuquerque, C. G.; Montenegro, S. M. G. L.; Montenegro, A. A. A.; Fontes Júnior, R. V. P. Recarga de aquífero aluvial sob uso agrícola. **Revista Águas Subterrâneas**, v.29, n.1, p.60-71, 2015.
- Andriotti, J. L. S. **Fundamentos de estatística e geoestatística**. São Leopoldo: UNISINOS, 165p., 2003.
- Bahir, M.; Ouhamdouch, S.; Ouazar, D.; El Moçayd, N. Climate change effect on groundwater characteristics within semi-arid zones from western Morocco. **Groundwater for Sustainable Development**, v.11, p.1-14, 2020.
- Barbosa, E.A.A.; Matsura, E.E.; Santos, L.N.S.; Nazário, A.A.; Gonçalves, I.Z.; Feitosa, D.R.C. Soil attributes and quality under treated domestic sewage irrigation in sugarcane. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.22, p.137-142, 2018.

Batista, A. A.; Dutra, I.; Carmo, F. F.; Izidio, N. S. C.; Batista, R. O. Quality in papaya fruit produced with treated domestic sewage. **Revista Ciência Agronômica**, v.48, p.70–80, 2017.

Bertin, T.; Martin, J.A.R.; Weber, J.C.; Shepherd, K.D. Landscape approach to assess key soil functional properties in the highlands of Cameroon: Repercussions of spatial relationships for land management interventions. **Journal of Geochemical Exploration**, n.178, p.35-44, 2017.

Boufekane, A.; Saighi, O. Assessing groundwater quality for irrigation using geostatistical method- Case of wadi Nil Plain (North-East Algeria). **Groundwater for Sustainable Development**, v.8. p179-186, 2019.

Buss, R. N.; Silva, R. A.; Siqueira, G. M.; Leiva, J. O. R.; Oliveira, O. C. C.; França, V. L. Spatial and multivariate analysis of soybean productivity and soil physical-chemical attributes. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.23, p.446-453, 2019.

Carvalho, A. A.; Montenegro, A. A. A.; Assis, F. M. V.; Tabosa, J. N.; Cavalcanti, R. Q.; Almeida, T. A. B. Spatial dependence of attributes of rainfed maize under distinct soil cover conditions. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.23, p.33-39, 2019.

Carvalho, A.A.; Montenegro, A.A.A.; Silva, H. P.; Lopes, I.; Morais, J. E. F.; Silva, T.G.F. Trends of rainfall and temperature in Northeast Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.24, p.15-23, 2020a.

Carvalho, A.A.; Montenegro, A.A.A.; Tabosa, J.N.; Almeida, T.A.B.; Silva, A.G.O.; Silveira, A.V.M. Reúso hidroagrícola: uma solução para convivência com a escassez hídrica no Sertão e Agreste pernambucano. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v.5, n.2, p.140-150, 2020b.

Cavalcante, K. L.; Deon, M. D.; Silva, H. K. P. Acidez e matéria orgânica de solo irrigado com efluente de estações de tratamento de esgoto de Petrolina-PE. **Revista Semiárido de Visu**, v.4, p.181–189, 2016.

Cay, T.; Uyan, M. Spatial and Temporal Groundwater Level Variation Geostatistical Modeling in the City of Konya, Turkey. **Water Environment Research**, v.81, n.12, p. 2460-2470, 2009.

Coelho, V. H. R.; Montenegro, S. M. G. L.; Almeida, C. N.; Silva, B. B.; Oliveira, L. M. M.; Gusmao, A. C. V.; Freitas, E. S.; Montenegro, A. A. A. Alluvial groundwater recharge estimation in semi-arid environment using remotely sensed data. **Journal of Hydrology**, v. 548, p.1-15, 2017.

Delbari, M.; Amiri, M.; Motlagh, M.B. Assessing groundwater quality for irrigation using indicator kriging method. **Applied Water Science**, n.6, p.371-381, 2016.

Del-Toro-Guerrero, F.J.; Kretschmar, T. Precipitation-temperature variability and drought episodes in northwest Baja California, México. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, n. 27, p.1-14, 2020.

Dornelles, H.; Matsuoka, M.; Binelo, L.; Pauvels, L.; Caron, C.; Silva, V. Biomassa e atividade microbiana de solos com aplicação de resíduo sólido urbano e dejetos líquidos de suínos. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, n.44, p.18-26, 2017.

Eltarabily, M. G.; Negm, A.M.; Yoshimura, C.; Abdel-Abdel-Fattah, S.; Saavedra, O.C. Quality Assessment of Southeast Nile Delta Groundwater for Irrigation. **Water Resources**, v. 45, n. 6, p.975–991, 2018.

Farid, H.U.; Ahmad, I.; Anjum, M.N.; Khan, Z.M.; Iqbal, M.M.; Shakoor, A.; Mubeen, M. Assessing seasonal and long-term changes in groundwater quality due to over-abstraction using geostatistical techniques. **Environmental Earth Sciences**, v.78, n.386, 2019.

Fontes Júnior, R.V.P.; Montenegro, A.A.A.; Montenegro, S.M.G.L; Santos, T.E.M. Estabilidade temporal da potencialidade e da salinidade no vale aluvial no semárido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.11, p.1188-1197, 2012.

Fontes Júnior, R.V.P; Montenegro, A.A.A. Impact of land use change on the water balance in a representative watershed in the semiarid of the state of Pernambuco using the SWAT model. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola**, v.39, n.1, p.110-117, 2019.

Gehyi, H. R.; Paz, V.P.S.; Medeiros, S.S.; Galvão, C.O. **Recursos hídricos em regiões semiáridas: estudos e aplicações**. Campina Grande: Instituto Nacional do Semiárido, 288p., 2012.

Gribilla, A.; Anournu, G.; Adomaki, D. Trend analysis and ARIMA modelling of recent groundwater levels in the White Volta River basin of Ghana. **Groundwater for Sustainable Development**, v.6, p.150-163, 2018.

Guçlu, Y.S. Improved visualization for trend analysis by comparing with classical Mann-Kendall test and ITA. **Journal of Hydrology**, v.584, p.1-9, 2020.

Haas, J.C.; Birk, S. Trends in Austrian groundwater – Climate or human impact? **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v.22, p.1-17, 2019.

Hasda, R.; Rahaman, M. F.; Jahan, C.S.; Molla, K.I.; Mazumder, Q.H. Climatic data analysis for groundwater level simulation in drought prone Barind Tract, Bangladesh: Modelling approach using artificial neural network. **Groundwater for Sustainable Development**, v. 10, p.1-15, 2020.

Hu, K.X.; Awange, J.L.; Kuhn, M.; Saleem, A. Spatio-temporal groundwater variations associated with climatic and anthropogenic impacts in South-West Western Australia. **Science of the Total Environment**, v.696, p.1-18, 2019.

Karandish, F.; Shahnazari, A. Appraisal of the geostatistical methods to estimate Mazandaran coastal ground water quality. **Caspian Journal of Environmental Sciences**, v.12, p.129-146, 2014.

Kawo, N. S.; Karuppanan, S. Groundwater quality assessment using water quality index and GIS technique in Modjo River Basin, central Ethiopia. **Journal of African Earth Sciences**, v.147, p.300–311, 2018.

Kendall, M., 1975. **Rank Correlation Methods**. Charles Griffin, London.

Khalid, S. An assessment of groundwater quality for irrigation and drinking purposes around brick kilns in three districts of Balochistan province, Pakistan, through water quality index and multivariate statistical approaches. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 197, p. 14–26, 2019.

Kumar, M.; Kumari, K.; Ramanathan, A.; Saxena, R. A comparative evaluation of groundwater suitability for irrigation and drinking purposes in two intensively cultivated districts of Punjab, India. **Journal of Environmental Geology**, n.53, p. 553-574, 2007.

Kumar, S.; Sangeetha, B. Assessment of ground water quality in Madurai city by using geospatial techniques. **Groundwater for Sustainable Development**, v.10, p.1-6, 2020.

Landim, P. M. B. **Análise estatística de dados geológicos**. 2.ed. São Paulo: UNESP. 253p., 2003.

Lira, R.M.; Santos, A.N.; Silva, J. S.; Barnabé, J.M.C.; Barros, M.S.; Soares, H.R. A utilização de águas de qualidade inferior na agricultura irrigada. **Revista Geama**, v.1, p.341–362, 2015.

Mackay, R.; Montenegro, A. A. A.; Montenegro, .M.G.L. Wonderen, J. v. Alluvial Aquifer Indicators for small-scale irrigation in Northeast Brazil **In: Webb, B., Hirata, R., Kruse, E., Vrba, J. Sustainability of Groundwater Resources and Indicators-** Red Book IAHS Publ. 302. , Wallinford, v.1, p.1–9, 2005

Mann, H.B., 1945. Nonparametric tests against trend. **Econometrica**, n.13, 245–259.

Masoud, A.A.; El-Horiny, M.M.; Atwia, M.G.; Gemail, K.S.; Koike, K. Assessment of groundwater and soil quality degradation using multivariate and geostatistical analyses, Dakhla Oasis, Egypt. **Journal of African Earth Sciences**, n.142, p.64-81, 2018.

Meinshausen, M., Smith, S.J., Calvin, K., Calvin, K., Daniel, J.S., Kainuma, M.L.T., Lamarque, J-F., Matsumoto, K., Montzka, S.A., Raper, S.C.B., Riahi, K., Thomson, A., Velders, G.J.M., van Vuuren, D.P.P. The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. **Climate Change**, v.109, p.213–241, 2011. DOI:

Moghazy, N.H.; Kaluarachchi, J.J. Assessment of groundwater resources in Siwa Oasis, Western Desert, Egypt. **Alexandria Engineering Journal**, v.59, p.149-163, 2020.

Monteiro, A. L. N.; Montenegro, A. A. A.; Montenegro, S. M. G. L. Modelagem de fluxo e análise do potencial hídrico de aquífero aluvial no semiárido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.19, n.3, p.151-163, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v19n3.p151-163>.

Monte-Mor, R.C.A. **Análise de processos hidrológicos em bacias de rios intermitentes no semiárido mineiro. (Tese de doutorado)**. Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Escola de Engenharia, UFMG, 281p., 2012.

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**, v.10, p.30-37, 2006.

Montenegro, A. A. A.; Ragab, R. Hydrological response of a Brazilian semiarid catchment to different land use and climate change scenarios: modeling study. **Hydrological Processes**, v.24, p.2705-2723, 2010.

Montenegro, S. G. L.; Silva Junior, J. G.; Montenegro, A. A. A.; Carvalho, J. F.; Albuquerque Filho, J. A. C. Experimentação e modelagem do avanço de sais no perfil do solo em área cultivada com repolho sob alternativas de manejo de irrigação, no semiárido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.8, p.148–155, 2013.

Moss, R.H., Edmonds, J.A., Hibbard, K.A., Manning, M.R., Rose, S.K., van Vuuren, D.P., Carter, T.R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G.A, Mitchell, J.F.B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S.J., Stouffer, R.J., Thomson, A.M., Weyant, J.P., Wilbanks, T.J. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. **Nature**, v.463, p.747–756, 2010.

Otich, B.C.C.; Studart, T.M.C.; Campos, J.N.B.; Portela, M.M. Gestão de Recursos Hídricos em Regiões Semiáridas e a Dependência da Trajetória Institucional: Nordeste Brasileiro e Austrália. **Revista Recursos Hídricos**, n. 40, n.1, p.43-51, 2019.

Patel, M.P.; Gami, B.; Patel, A.; Patel, P.; Patel, B. Climatic and anthropogenic impact on groundwater quality of agriculture dominated areas of southern and central Gujarat, India. **Groundwater for Sustainable Development**, n.10, p.1-11, 2020.

Peña-Arancibia, J.L.; Mainuddin, M.; Ahmad, M.D.; Hodgson, G.; Murad, K.F.I.; Ticehurst, C.; Maniruzzaman, M.; Mahboob, M.G.; Kirby, J.M. Groundwater use and rapid irrigation expansion in a changing climate: Hydrological drivers in one of the world's food bowls. **Journal of Hydrology**, v.581, p.1-16, 2020.

Pohl, S.C.; Lenz, D.M. Utilização de efluente tratado em complexo industrial automotivo. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v.22, p.551–562, 2017.

Ran, Y.; Li, X.; Ge, Y.; Lu, X.; Lian, Y. Optimal selection of groundwater-level monitoring sites in the Zhangye Basin, Northwest China. **Journal of Hydrology**, v.525, p.209–215, 2015.

Reddy, B. M.; Sunitha, V. Prasad, M.; Reddy, Y.S.; Reddy, M.R. Groundwater for Sustainable Development Evaluation of groundwater suitability for domestic and agricultural utility in semi-arid region of Anantapur, Andhra Pradesh State, South India. **Groundwater for Sustainable Development**, v. 9, p. 1-12, 2019.

- Ribeiro, L.; Kretschmer, N.; Nascimento, J.; Buxo, A.; Rotting, T.; Soto, G; Señoret, M.; Oyarzún, J.; Maturana, H.; Oyarzún, R. Evaluating piezometric trends using the Mann-Kendall test on the alluvial aquifers of the Elqui River basin, Chile. **Hydrological Sciences Journal**, n.60, v.10, 1840-1852, 2015.
- Samantara, M. K.; Padhi, R.K.; Sowmya, M.; Kumaran, P.; Satpathy, K.K. Heavy metal contamination, major ion chemistry and appraisal of the groundwater status in coastal aquifer, Kalpakkam, Tamil Nadu, India. **Groundwater for Sustainable Development**, v.5, p.49–58, 2017.
- Sen, P.K., Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. **Journal of the American Statistical Association**, v.63, n.324, p.1379–1389, 1968.
- Silva, R. O. B.; Montenegro, S. M. G. L.; Souza, W. M. Tendências de mudanças climáticas na precipitação pluviométrica nas bacias hidrográficas do estado de Pernambuco. **Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.22, p.579-589, 2017.
- Slama, T.; Sebei, A. Spatial and temporal analysis of shallow groundwater quality using GIS, Grombalia aquifer, Northern Tunisia. **Journal of African Earth Sciences**, n. 170, p.1-17, 2020.
- Takoutsing, B.; Martín, J.A.R.; Weber, J.C.; Shepherd, K.; Sila, A.; Tondoh, J. Landscape approach to assess key soil functional properties in the highlands of Cameroon: Repercussions of spatial relationships for land management interventions. **Journal of Geochemical Exploration**, n.178, p.35-44, 2017.
- Tan, M.L., Ibrahim, A.L., Yusop, Z., Chua, V.P., Chan, N.W. **Atmospheric Research**, v.189, p.1–10, 2017.
- Taylor, K.E., Stouffer, R.J., Meehl, G.A. An overview of CMIP5 and the experiment design. **The Bulletin of the American Meteorological Society**, v.93, n.4, p.485–498, 2012.
- Tesfaye, S.; Taye, G.; Birhane, E. Observed and model simulated twenty-first century hydro-climatic change of Northern Ethiopia. **Journal of Hydrology**, v.22, 2019.
- Ticehurst, C.; Maniruzzaman, M.; Mahboob, M.G.; Kirby, J.M. Groundwater use and rapid irrigation expansion in a changing climate: Hydrological drivers in one of the world's food bowls. **Journal of Hydrology**, v. 581, p.1-16, 2020.
- Tziritiz, E.; Skordas, K.; Kelepertsis, A. The use of hydrogeochemical analyses and multivariate statistics for the characterization of groundwater resources in a complex aquifer system. A case study in Amyros River basin, Thessaly, central Greece. **Environmental Earth Sciences**, n.339, v.75, p.1-11, 2016.
- Vachaud, G.; Silans, A. P.; Balabanis, P.; Vauclin, M. Temporal stability of spatially measured soil water probability density function. **Soil Science Society of America Journal**, v.49, p.822- 827, 1985.

Van Vuuren, D.P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G.C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S.J., Rose, S.K., **The representative concentration pathways: an overview**, v.109, p.5-31, 2011.

Vazifehkhah, S.; Kahya, E. Hydrological and agricultural droughts assessment in a semi-arid basin: Inspecting the teleconnections of climate indices on a catchment scale. **Agricultural Water Management**, v.217, p.413–425, 2019.

Velasco, E.M.; Gurdak, J.J.; Dickinson, J.E.; Ferré, T.P.; Corona, C.R. Interannual to multidecadal climate forcings on groundwater resources of the U.S. West Coast. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v.11, p.250-265, 2017.

Xu, M.; Kang, S.; Wu, H.; Yuan, X. Detection of spatio-temporal variability of air temperature and precipitation based on long-term meteorological station observations over Tianshan Mountains, Central Asia. **Atmospheric Research**, v.203, p.141-163, 2018.

Yacoub, E.; Tayfur, G. Spatial and temporal of variation of meteorological drought and precipitation trend analysis over whole Mauritania. **Journal of African Earth Sciences**, v.163, p.1-12 2020.

Yang, J.; Ye, M.; Tang, Z.; Jiao, T.; Song, X.; Pei, Y.; Liu, H. Using cluster analysis for understanding spatial and temporal patterns and controlling factors of groundwater geochemistry in a regional aquifer. **Journal of Hydrology**, n.583, p.1-15, 2020.

Yang, Q.; Li, Z.; Ma, H.; Wang, L.; Martín, J.D. Identification of the hydrogeochemical processes and assessment of groundwater quality using classic integrated geochemical methods in the Southeastern part of Ordos basin, China. **Environmental Pollution**, v.218, p.879-888, 2016. DOI: 10.1016/j.envpol.2016.08.017

## CAPÍTULO II

---

Almeida, T. A. B. Análise de tendência de níveis potenciométricos e de salinidade em aquífero aluvial do Semiárido. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2020.

### Resumo

A escassez de recursos hídricos tem forte impacto no desenvolvimento do semiárido brasileiro. As águas subterrâneas são frequentemente uma fonte segura de água, entretanto as frequentes superexplorações, atreladas às mudanças climáticas ameaçam a disponibilidade futura deste recurso. Neste aspecto, as séries temporais piezométricas são essenciais para a gestão desses aquíferos, frente à crescente demanda e impactos antrópicos. O objetivo do presente estudo consiste em avaliar a tendência e a magnitude de séries temporais de longa duração, tanto piezométricas, quanto de salinidade das águas subterrâneas, assim como avaliar a sazonalidade da precipitação, temperaturas, evapotranspiração e explorações, no período de 2000 a 2020, em um vale aluvial irrigado do semiárido brasileiro. O estudo foi realizado no vale aluvial da Bacia do Riacho Mimoso, sub-bacia do Alto Ipanema, localizada no município de Pesqueira, Pernambuco, com base em rede de monitoramento de piezômetros e poços. Pontos de monitoramento estáveis representativos foram investigados, para piezometria e salinidade, utilizando-se o método das diferenças relativas e a validação por correlação, entre a média da variável no piezômetro estável e a média dos demais piezômetros, ao longo do tempo. A tendência dos dados foi analisada pelo método de Mann-Kendall, e as magnitudes pelo teste de Sen's Slope. Verificou-se que, em relação ao nível piezométrico, que pontos estáveis podem ser identificados, e representaram o comportamento médio do vale aluvial, enquanto para a salinidade, os pontos de maior estabilidade não foram capazes de identificar adequadamente o comportamento médio da salinidade. As séries temporais nos pontos estáveis apresentaram tendências descendentes semelhantes à tendência média, e mostraram-se relevantes na avaliação da sazonalidade, já que as águas subterrâneas nesse vale são altamente dependentes da permanência de vazões no curso d'água superficial, cuja intermitência no período seco e as altas taxas de explorações para irrigação provocam elevados rebaixamentos. Foram identificadas tendências anuais descendentes significativas na média das séries piezométricas e pluviométrica de  $-0,074 \text{ m ano}^{-1}$  e  $-1,26 \text{ mm ano}^{-1}$ , respectivamente, não havendo padrão de variação definido para a condutividade elétrica.

Tendências crescentes na temperatura e evapotranspiração foram identificadas, que atreladas às tendências ascendentes de explorações, devido ao aumento da demanda para irrigação, tendem a agravar os cenários de disponibilidade de recursos hídricos na região, nas próximas décadas, com um risco de colapso no suprimento de água.

**Palavras-chave:** Estabilidade temporal, Dinâmica hidrossalina, Mann Kendall, Sen's Slope

Almeida, T. A. B. Trend analysis of potentiometric and salinity levels in alluvial aquifer of the Semiarid. Thesis (Master's degree in Agricultural Engineer) – Federal Rural University of Pernambuco, 2020.

### **Abstract**

Water resources scarcity has a strong impact on the development of the Brazilian semiarid. Groundwater is often a safe water source, however frequent overexploitation, linked to climate change, threatens the future availability of this resource. In this aspect, piezometric time series are essential for the management of these aquifers, given the increasing demand and anthropic impacts. The aim of the present study is to assess the trend and magnitude of long-term time series, both piezometric and groundwater salinity, as well as to assess the seasonality of precipitation, temperatures, evapotranspiration and exploitations, in the period from 2000 to 2020, in an irrigated alluvial aquifer of the Brazilian semiarid. The study was carried out in the alluvial aquifer of the Riacho Mimoso Basin, in the Alto Ipanema sub-basin, located in the municipality of Pesqueira, Pernambuco, based on a piezometer and well monitoring. Representative stable monitoring points were investigated for piezometry and salinity, using the method of relative differences and validation by correlation, between the mean of the variable in the stable piezometer and the mean of the other piezometers, over time. The trend analysis of the data was carried out by the Mann-Kendall method, and the magnitudes by the Sen's Slope test. It was found that, in relation to the piezometric level, stable points can be identified, and represented the average behavior of the alluvial aquifer, while for salinity, the points of greater stability were not able to adequately identify the average behavior of salinity. The time series at stable points showed downward trends similar to the average trend, and were relevant in the assessment of seasonality, since the groundwater in this valley is highly dependent on the permanence of flows in the surface watercourse, whose intermittency in the dry period and the high rates of exploitation for irrigation cause high drawdowns. Significant downward annual trends were identified in the mean of the piezometric and pluviometric series of  $-0.074 \text{ m year}^{-1}$  and  $-1.26 \text{ mm year}^{-1}$ , respectively, with no defined variation pattern for electrical conductivity. Increasing trends in temperature and evapotranspiration have been identified, which, coupled with rising exploitation trends, due to the increased demand for irrigation, tend to aggravate the scenarios

of water resources availability in the region, in the coming decades, with a risk of collapse in water supply.

**Keywords:** Temporal stability, Hydrosaline dynamics, Mann Kendall, Sen's Slope

## 1 INTRODUÇÃO

As estiagens fazem parte da dinâmica natural do ambiente semiárido, usualmente impactando a oferta hídrica para usos múltiplos. Com base em registros históricos e previsões futuras, Marengo e Bernasconi (2015) constataram o elevado risco de aridificação nas terras semiáridas e alertaram para as projeções climáticas regionais, que apontam para reduções de chuva, aumento de temperatura e déficits de água por períodos mais longos, levando a secas e condições áridas ainda mais extremas no futuro. Para o semiárido brasileiro, Carvalho et al. (2020) alertam também para a redução do número de dias chuvosos, com impactos na disponibilidade futura de recursos hídricos, agravando os cenários de escassez hídrica.

Os aquíferos aluviais são estratégicos para o semiárido. Entretanto, tais aquíferos apresentam usualmente limitada disponibilidade hídrica, devido às características geomorfológicas e dimensões dessas unidades geológicas, e características climáticas, em particular do regime pluviométrico irregular (ANDRADE et al, 2014; FONTES JÚNIOR et al, 2017). Os baixos índices pluviométricos e a alta evapotranspiração potencial no semiárido brasileiro são responsáveis pelo déficit hídrico da região, limitando a recarga aquíferos aluviais, ameaçando a disponibilidade hídrica, em particular durante longos períodos de seca (MONTENEGRO; RAGAB, 2010). Coelho et al. (2017) utilizaram ferramentas de geoprocessamento e sensoriamento remoto para avaliar a variabilidade espacial da recarga subterrânea na Bacia do Ipanema-PE, ressaltando a importância dos vales aluviais e a vulnerabilidade desses aquíferos a alterações nos regimes pluviométricos. Para o semiárido de Marrocos, Bahir et al. (2020) constataram o significativo declínio dos níveis piezométricos de aquífero regional, para um período de 43 anos, e detectaram a elevada vulnerabilidade de tais reservas hídricas aos efeitos adversos das mudanças climáticas. Análises de variabilidade espaço temporal da qualidade das águas subterrâneas apontam para uma crescente deterioração das reservas disponíveis.

Além do impacto climático, os impactos antropogênicos, como o aumento do bombeamento de aquíferos, também se configuram como fatores que podem acarretar seu esgotamento qualitativo e quantitativo, provocando rebaixamentos excessivos em sua potenciometria (RIBEIRO et al., 2015). Desse modo, há uma necessidade crescente de se desenvolver programas de monitoramento regulares do uso dos recursos hídricos, e estudos que identifiquem os mecanismos de recarga preponderantes (BURTE et al., 2005; COELHO et al., 2017).

O vale aluvial do Riacho do Mimoso, semiárido de Pernambuco, vem sendo frequentemente estudado e monitorado nas últimas décadas, em relação à distribuição espacial e temporal das águas subterrâneas (MONTENEGRO, 1997; MONTEIRO et al., 2014; FONTES JÚNIOR; MONTENEGRO, 2017), à qualidade das águas (ANDRADE et al., 2012), aos mecanismos de recarga (COELHO et al., 2017), e à produção agrícola (SANTOS et al., 2018). Essas investigações ressaltam seu potencial para a agricultura irrigada, porém apontam para os riscos de salinização de água e solo.

Nos vales aluviais, a qualidade da água apresenta, quanto à salinidade, forte variação sazonal, sendo influenciada pelos condicionantes antrópicos, hidrológicos e, climáticos (BURTE et al., 2005; ANDRADE et al., 2012; PANZAND et al., 2018). A investigação da qualidade nas águas subterrâneas é essencial no desenvolvimento de estratégias de gestão (KUMAR; SANGEETHA, 2020). Para Mackay et al. (2005) e Boufekane e Saighi (2019), a condutividade elétrica é um indicador eficiente da qualidade das águas subterrâneas em perímetros irrigados no semiárido.

A análise de séries temporais dos níveis potenciométricos é essencial para o planejamento de estratégias de gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos, fornecendo bases para a sua sustentabilidade (ABDULLAHI et al., 2015; GRIBILA et al., 2018). Entretanto, o monitoramento regular é um procedimento oneroso, que pode ser otimizado a partir da identificação de locais de monitoramento representativos da área de interesse. Visando reduzir esforços e custos de monitoramento de umidade do solo, Vachaud et al. (1985) propuseram uma metodologia que associa a estabilidade no tempo de medições em locais estratégicos, em relação ao comportamento médio de um domínio em estudo.

A estabilidade temporal é baseada na suposição de que os padrões espaciais de medições experimentais tendem a persistir ao longo do tempo em um domínio. Souza et al. (2011) aplicaram a metodologia da estabilidade temporal em um lote irrigado no vale aluvial do Mimoso, Brasil, e indicaram com sucesso locais onde a variação no tempo refletia o comportamento médio da umidade do solo para toda a área cultivada. Já em escala de perímetro irrigado, Fontes Júnior et al. (2012) também aplicaram a referida metodologia ao monitoramento de níveis potenciométricos e condutividade elétrica das águas subterrâneas do mesmo vale aluvial, com base em uma rede de monitoramento de 56 piezômetros, e constataram que apenas as medições de níveis mensais podiam ser adequadamente representadas temporalmente por pontos estáveis, não tendo sido possível identificar locações

representativas da variabilidade espaço temporal da salinidade. Ran et al. (2015) combinaram geoestatística com a técnica da estabilidade temporal, e apresentaram uma metodologia capaz de otimizar rede de monitoramento de níveis potenciométricos em aquífero da China, constituindo-se em uma importante ferramenta para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos. Mais recentemente, Yang et al. (2020) verificaram que a variabilidade espaço temporal da qualidade da água subterrânea é fortemente influenciada pelas heterogeneidades do meio, estando condicionada à distribuição das zonas de recarga, de descarga, e de mistura.

Em longo prazo, a variabilidade temporal de variáveis ambientais relacionadas às águas subterrâneas pode ser investigada através de análises de tendência. Nos últimos anos, a análise de tendência em variáveis relacionadas à disponibilidade das águas subterrâneas tornou-se uma abordagem frequente para investigar os padrões de variação em diferentes escalas temporais e espaciais (SISHODIA et al, 2016; LE BROCCQUE et al., 2018; BIBI et al., 2019). Um dos procedimentos mais utilizados é o teste de tendência de Mann-Kendall (MK) ((MANN (1945); KENDALL (1975)) atrelado ao estimador de declive de Sen's slope (SEN, 1968), que estima a presença, o declive e magnitude de uma tendência linear. Na hidrologia de águas subterrâneas, o teste MK vem sendo utilizado tanto para detectar tendências em variáveis de qualidade (KAOWN et al., 2012; MOGHAZY; KALUARACHCHI, 2020), quanto em séries temporais piezométricas (HAAS; BIRL, 2019; HU et al., 2019), de precipitação (DEL-TORO GUERRERO; KRETZSCHMAR, 2020) e de evapotranspiração (PEÑA-ARANCIBIA et al., 2020).

Dentro deste contexto, o objetivo do presente estudo consiste em avaliar a sustentabilidade hídrica de um vale aluvial do semiárido brasileiro (Vale do Mimoso), a partir da identificação de pontos estáveis de monitoramento, bem como da análise de tendências (e as suas magnitudes, caso existam) em séries temporais de longa duração para potenciometria e salinidade das águas subterrâneas, relacionando-as com os padrões temporais de exploração e de variáveis climáticas na região.

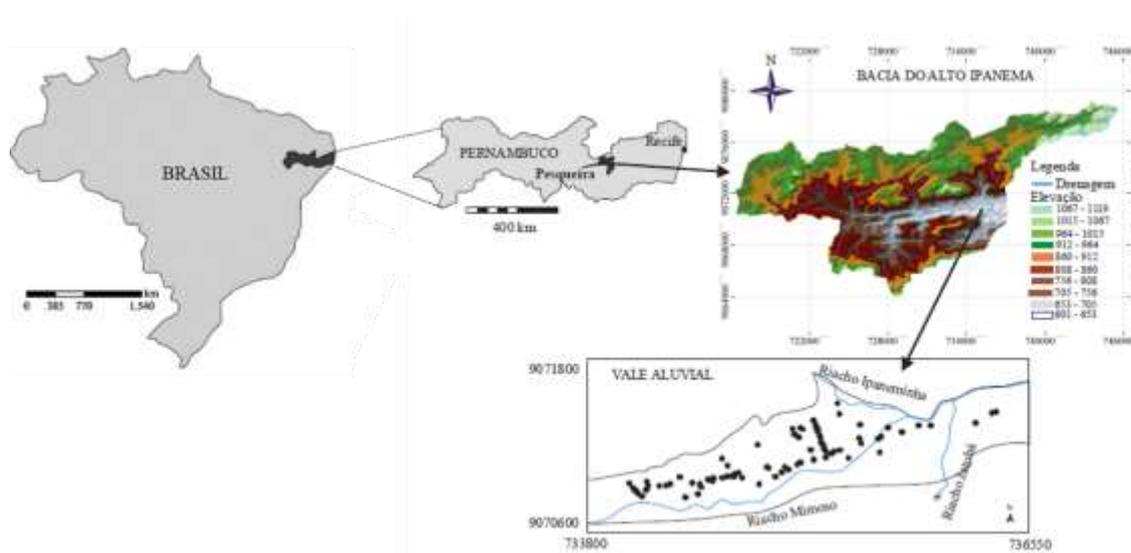
## **2 MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1 Área de Estudo**

O vale aluvial em estudo está localizado na Bacia do Riacho Mimoso (BRM), sub-bacia do Alto Ipanema, localizada no município de Pesqueira, Região Agreste do Estado de Pernambuco, Brasil. De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo

BSsh (extremamente quente, semiárido), com pluviosidade média anual de 630 mm. O aquífero estudado possui espessura média em torno de 10 m, cerca de 3 km de extensão e 300 m de largura, com um declive topográfico natural de aproximadamente 0,3% (Oeste-Leste), induzindo um fluxo subterrâneo natural na mesma direção e sentido (MONTENEGRO et al., 2003).

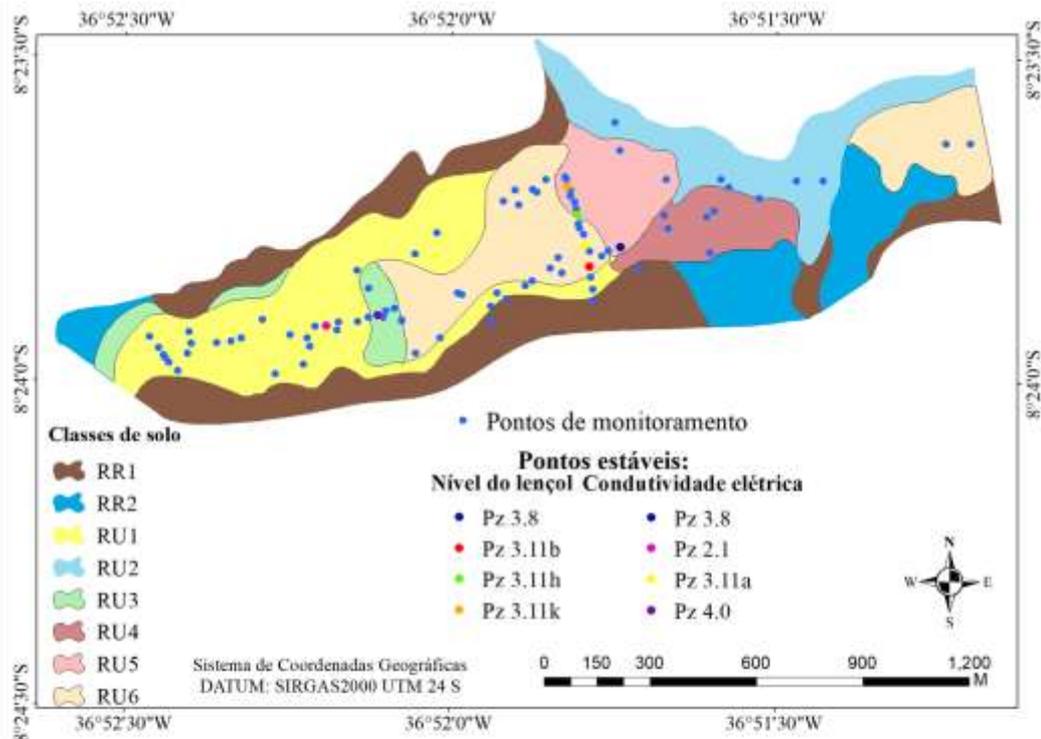
A rede de drenagem da BRM é composta pelos riachos Mimoso, Ipaneminha e Jatobá (Figura 1), sendo o primeiro, embora intermitente, o principal curso de água da bacia, conectado ao aquífero em toda a sua extensão (MONTENEGRO; MONTENEGRO, 2006).



Fonte: Adaptada de Fontes Júnior et al., 2012

Figura 1 - Mapa de localização do vale aluvial do Riacho Mimoso, bacia do Alto Ipanema, município de Pesqueira-PE.

A área de estudo possui uma rede de poços de bombeamento e piezômetros georreferenciados. Cada piezômetro possui cerca de 6 m de profundidade e diâmetro de 75 mm (MONTENEGRO, 1997). Na Figura 2 estão apresentados os piezômetros considerados no presente estudo.



RR1 - Neossolo Regolítico (Eutrófico léptico + Neossolo Litólico Eutrófico típico, ambos fase suave ondulado);  
 RR2 Neossolo Regolítico (Eutrófico solódico textura média (leve) fase relevo plano e suave ondulado);  
 RU1 Neossolo Flúvico Tb (Eutrófico típico textura arenosa ou média (leve) / média (leve) ou arenosa moderadamente drenado);  
 RU2 Neossolo Flúvico Tb (Eutrófico típico textura média (leve) / média (leve) ou arenosa moderadamente drenado);  
 RU3 Neossolo Flúvico (Sódico típico textura média (leve) / média ou arenosa moderadamente drenado);  
 RU4 Neossolo Flúvico (Sódico típico textura média / média (leve) ou arenosa moderadamente drenado);  
 RU5 Neossolo Flúvico (Sódico salino textura média / média (leve) ou média imperfeitamente drenado);  
 RU5 Neossolo Flúvico (Sódico salino textura média imperfeitamente drenado)

Figura 2 - Mapa da classificação pedológica da área em estudo (Correa; Ribeiro, 2001) e localização dos piezômetros.

Existem na área, atualmente, 50 piezômetros em funcionamento e 28 poços de grande diâmetro utilizados para irrigação. Para este estudo, foram analisados 35 piezômetros e 25 poços no período de janeiro de 2000 a janeiro de 2020, contabilizando-se 241 meses de monitoramento. Os poços são utilizados principalmente para irrigação de vegetais, hortaliças, milho e pastagem. A extração média de água nos poços é de  $45,16 \text{ m}^3/\text{dia}^{-1}$ , atingindo vazão máxima em alguns de cerca de  $300 \text{ m}^3/\text{dia}^{-1}$  em alguns poços (MONTEIRO et al., 2014).

## 2.2 Monitoramento e dados climáticos

O monitoramento do vale aluvial é conduzido mensalmente desde 1995 (Montenegro, 1997), através de leituras do nível da água nos piezômetros e de coleta de amostras da água para posterior leitura da condutividade elétrica (CE). A precipitação (P), temperatura mínima (T<sub>mín</sub>), média (T<sub>méd</sub>) e máxima (T<sub>máx</sub>) foram medida por uma estação meteorológica automática da *Campbell Scientific* instalada no vale aluvial, e obtidas no site do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) para o período de 2000 a 2020.

A evapotranspiração (ET<sub>0</sub>) de referência foi obtida de acordo com o método de Penman-Monteith da FAO (Equação 1), utilizando os dados climatológicos registrados na estação automática e dados baixados do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). Tem-se que:

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

onde, ET<sub>0</sub> = evapotranspiração de referência (mm.dia<sup>-1</sup>); R<sub>n</sub> = radiação útil na superfície da cobertura vegetal (MJ.(m<sup>2</sup>.d<sup>-1</sup>)<sup>-1</sup>); G = densidade do fluxo de calor no solo (MJ.(m<sup>2</sup>.d<sup>-1</sup>)<sup>-1</sup>); T = temperatura média diária a 2 m de altitude (°C); u<sub>2</sub> = velocidade do vento a 2 m de altitude (m.s<sup>-1</sup>); e<sub>s</sub> = pressão do vapor de saturação (kPa); e<sub>a</sub> = pressão de vapor (kPa); Δ = tangente da curva de pressão de vapor (kPa.°C<sup>-1</sup>); γ = constante psicrométrica (kPa.°C<sup>-1</sup>).

### 2.3 Estimativa das vazões bombeadas nos poços e nos lotes irrigados

Para estimar as taxas explotadas potenciais tanto pelos poços públicos como pelos cacimbões existentes ao longo do vale aluvial foi considerada o consumo efetivo, de acordo com a necessidade hídrica das culturas em uso, para atender a demanda dos lotes irrigados, vinculados a cada agricultor. Considerou-se a rotação de culturas em alguns lotes irrigados, onde estes realizavam o plantio de mais de uma cultura ao longo do ano.

As informações coletadas juntos ao agricultores acerca do uso do solo ao longo dos anos possibilitou a construção de um banco de dados com os parâmetros necessários para calcular a exploração mensal nos poços em estudo. A avaliação da necessidade hídrica extraída por bombeamento, foi realizada através da Equação 2:

$$Q = [((Etr * Kc) - P) * 10^3] * (Área * 10^4 * \eta) \quad (2)$$

Onde: Q= Vazão (m³/dia); Etr = Evapotranspiração de referência; Kc = coeficiente da cultura; P= Precipitação (mm); Área = Área irrigada pelos poços em estudo (ha); η= Eficiência do sistema de irrigação (adotou-se 70%).

Os valores do coeficiente de cultura (Kc) foram obtidos através de um levantamento bibliográfico (Tabela 1). Enquanto que os valores da Evapotranspiração de referência foram obtidos pelo método de Penman-Monteith da FAO, utilizando os dados climatológicos registrados na estação automáticas juntamente com os dados baixados pelo site do INMET.

Tabela 1 - Coeficiente das principais cultura das culturas irrigadas no Vale Aluvial.

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

\*\* Não disponível

O uso e ocupação do solo no vale foi caracterizado a partir de imagens remotas, levando em consideração os usos já caracterizados anteriormente por Montenegro e Montenegro (2006), Monteiro et al. (2010) e Fontes Júnior et al. (2012). Além disso, foram realizados levantamentos de campo para descrição dos tipos de uso, métodos de irrigação e

quantidade de horas total de bombeamento. A delimitação atual dos lotes irrigados foi realizada através de imagem de satélite, a partir do software Google Earth©.

## 2.4 Estabilidade temporal

Para a análise de estabilidade temporal do nível de água (nível) e da condutividade elétrica (CE) no período analisado de 2000 a 2020, foi utilizada com auxílio de planilha eletrônica a técnica proposta por Vachaud et al. (1985), que se baseia no cálculo da diferença relativa. Esta técnica permite a análise dos desvios entre os valores observados individualmente no espaço e a média entre eles (Equação 3).

$$\delta_{ij} = \frac{(X_{ij} - \bar{X}_j)}{\bar{X}_j} \quad (3)$$

$$\text{onde, } \bar{X}_j = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N X_{ij} \quad (4)$$

sendo  $\delta_{ij}$  a diferença relativa entre a determinação individual para um local  $i$  no tempo  $j$ ;  $X_{ij}$  o nível piezométrico ou a condutividade elétrica no local  $i$  e no tempo  $j$ ; e  $\bar{X}_j$  o valor médio do nível ou da condutividade elétrica para todas as posições  $N$ , no momento  $j$ . A média da diferença relativa para cada locação é definida pela Equação 5:

$$\bar{\delta}_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \delta_{ij} \quad (5)$$

em que  $m$  representa o número de meses estudados.

Para o desvio padrão temporal de cada locação, considera-se a Equação 6:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (\delta_{ij} - \bar{\delta}_i)^2} \quad (6)$$

O grau de correlação foi avaliado tomando-se por base o erro aleatório, o qual indica o nível de dispersão dos dados obtidos em relação à média. A precisão da análise está relacionada à similaridade entre os valores no piezômetro estável e a média nos demais

piezômetros. Matematicamente, esta similaridade pode ser avaliada através do índice de concordância (d) (Willmott et al., 2012), dado pela Equação 6:

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|\hat{y}'_i| + |y'_i|)^2} \quad (7)$$

em que, d = adimensional (variando de zero, para nenhuma concordância, a 1, para concordância perfeita). E  $y'_i$  e  $\hat{y}'_i$  estão descritos na Equação 8 e 9, respectivamente.

$$y'_i = y_i - \bar{y} \quad (8)$$

$$\hat{y}'_i = \hat{y}_i - \bar{y} \quad (9)$$

onde  $\hat{y}_i$  = valor no piezômetro estável;  $y_i$  = valor médio nos demais piezômetros no tempo e  $\bar{y}$  = média dos valores de todos os piezômetros no tempo.

O desempenho da estabilidade foi avaliado através do índice c (Equação 10), proposto por Camargo & Sentelhas (1997) e utilizado por Fontes Júnior et al. (2012) na avaliação da estabilidade temporal nesta mesma rede de piezômetros.

$$c = r \cdot d \quad (10)$$

onde, r = coeficiente de correlação; d = coeficiente de concordância.

## 2.5 Análise de tendência

Considerando os pontos estáveis e utilizando programação no software livre R, a estatística do teste S de Mann-Kendall foi aplicada para o nível de água e para a Condutividade Elétrica (Equação 11). O teste é baseado na hipótese nula ( $H_0$ ), em que os dados são identicamente distribuídos (sem tendência) e, alternativamente, hipótese  $H_A$ , na qual os dados seguem uma tendência monotônica à série temporal. O teste confirma a existência de um resultado positivo ou negativo.

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn} (x(j) - x(i)) \quad (11)$$

sendo  $n$  é o número de pontos de dados,  $x(j)$  e  $x(i)$  são os valores de dados da série temporal.

Cada ponto  $x(i)$  é usado como ponto de referência de  $(j)$ , e os resultados são registrados como sinal ( $\theta$ ) ( $1, \theta > 0$ ;  $0, \theta = 0$ ;  $-1, \theta < 0$ ). Se o conjunto de dados for distribuído de forma idêntica e independente, então a média de  $S$  é zero e a variação de  $S$  é conforme a Equação 12:

$$Var(S) = \frac{[n(n-1)(2n+5) - \sum_{t=1}^q t(t-1)(2t+5)]}{18} \quad (12)$$

em que  $n$  = tamanho do conjunto de dados;  $t$  = número de dados com valores repetidos dentro de um certo grupo; e  $q$  = número de grupos que contêm valores repetidos.

Para uma série temporal longa, o valor estatístico  $S$  pode ser transformado em  $Z$ , de acordo com as seguintes condições:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{Var(S)}} & \text{se } S > 0 \\ 0 & \text{se } S_k = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{Var(S)}} & \text{se } S_k < 0 \end{cases} \quad (13)$$

A hipótese nula é rejeitada ao nível  $\alpha$  de significância se  $|Z| > Z_{crit}$ , onde  $Z_{crit}$  é o valor da distribuição normal padrão com uma probabilidade de excedência de  $\alpha/2$ . A hipótese nula a ser testada no presente estudo é que não há tendência nos dados analisados.

Após a identificação das tendências, sua magnitude foi estimada através a metodologia de declive “Sen’s slope” (Sen, 1968), utilizando-se valores médios anuais. Este teste não paramétrico é calculado da seguinte forma:

$$\int \beta = \frac{x_j - x_k}{j - k}, \text{ para } j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (14)$$

sendo  $\beta$  = estimador de declive de Sen. Quando os valores são positivos, a tendência é positiva e, quando os valores são negativos, a tendência é negativa; e,  $x_j$  e  $x_k$  são os valores dados nos tempos  $j$  e  $k$  ( $j > k$ ), respectivamente.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Dinâmica hidrossalina do aquífero

Na Figura 3 pode-se observar o nível de água e a CE (condutividade elétrica) das águas subterrâneas em resposta aos eventos de chuva, de janeiro de 2000 a janeiro de 2020. As estações chuvosas da região ocorrem nos meses de abril a julho, e as secas de agosto a março, tendo pluviosidade média anual para o período analisado de 630 mm.

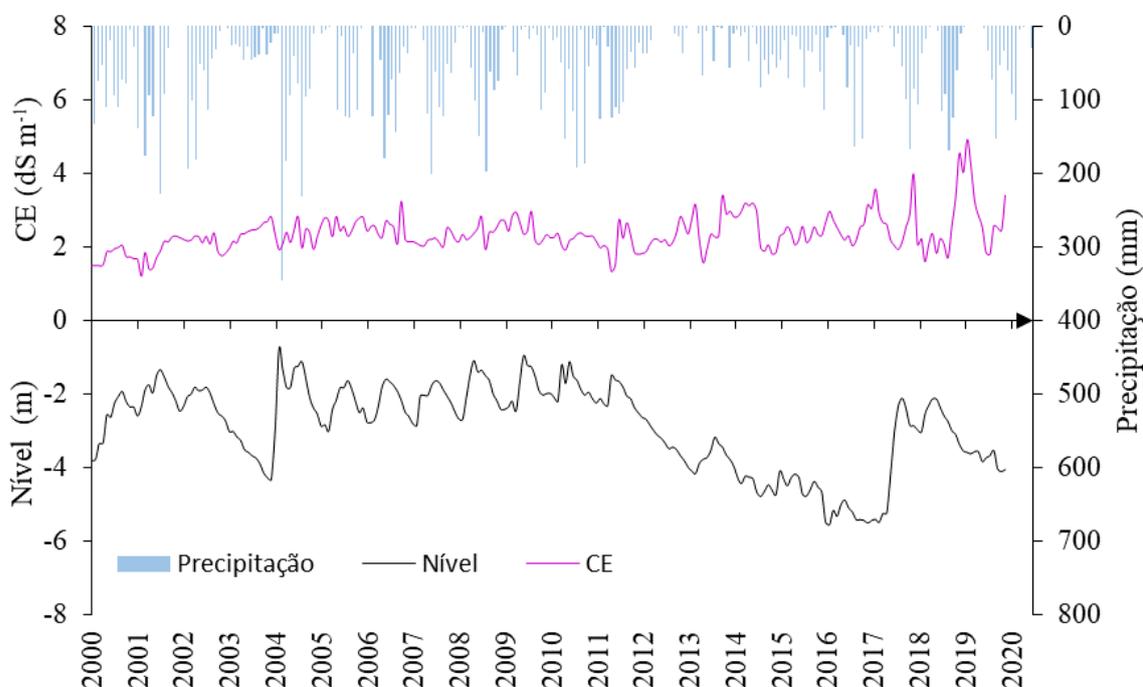


Figura 3 - Série temporal mensal dos níveis potenciométricos, CE (condutividade elétrica) e precipitação no vale aluvial Riacho do Mimoso.

A série temporal para o nível de água subterrânea apresenta variações sazonais, em função da precipitação, sendo possível notar o comportamento repetitivo em magnitudes diferentes ao longo do tempo, com picos de abril a julho e declínios de agosto a março.

A resposta do nível do aquífero aluvial aos eventos de precipitação é notavelmente mais acentuada do que a resposta da CE. Fontes Júnior et al. (2012), estudando o mesmo vale aluvial, constataram que o comportamento do nível é determinado pela distribuição da

precipitação, enquanto que a dinâmica salina do aquífero é menos evidente, já que outros fatores, como os impedimentos geológicos, podem interferir na dinâmica de sais das águas subterrâneas. Montenegro et al. (2003), analisando a dinâmica hidrossalina da condutividade elétrica do vale aluvial em estudo, destacaram a condutividade hidráulica e a textura do solo como fatores determinantes na dinâmica salina do vale. Além disso, a intensidade de extração, atrelado ao manejo incorreto da irrigação, são fatores que podem aumentar a concentração de sais na água (MONTEIRO et al., 2014). Kisi e Ay (2014) apontaram a necessidade de avaliar sazonalmente a variabilidade de parâmetros relacionados à qualidade da água.

Na Figura 4 pode-se observar a distribuição temporal, através de Box-plot, das médias mensais do nível de água (A) e da Condutividade Elétrica (CE) (B) de todos os piezômetros, para o período analisado.

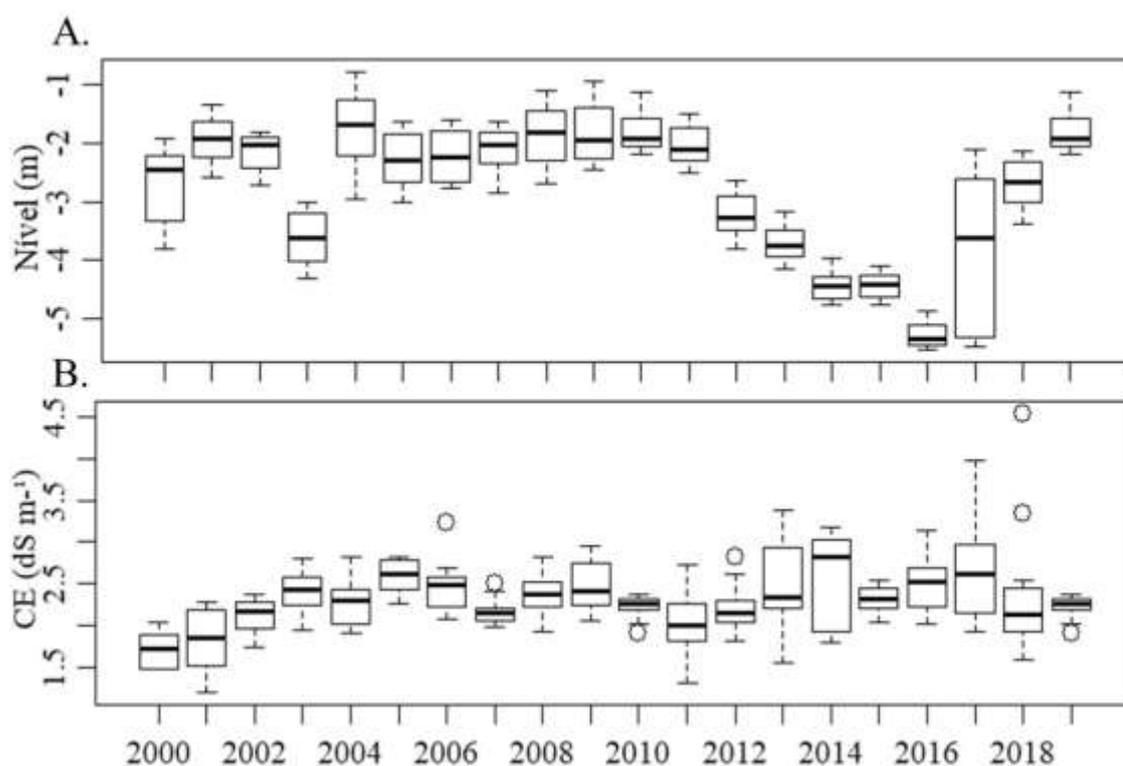


Figura 4 - Box-plot das médias anuais do nível potenciométrico (A) e da CE (B) para os anos de 2000 a 2019.

A análise do box-plot possibilita verificar que para os níveis freáticos (Figura 4A), não ocorreram *outliers*. O ano de 2004 apresentou níveis médios mais altos em relação aos demais anos, em função de uma precipitação anual acumulada de 1.183 mm. Observa-se ainda uma

depreciação no nível médio durante o período de 2012 a 2016, devido aos baixos valores de precipitação total anual, consistindo em 218, 413, 482, 405 e 498 mm, respectivamente.

Observa-se na Figura 4B, que o box-plot da condutividade elétrica exibe valores discrepantes, mas sem a presença de valores extremos. Estes *outliers* também foram encontrados por Andrade et al. (2012), ao analisarem a dependência espacial da condutividade elétrica no vale do Mimoso, e, de acordo com os autores, esses valores representam os períodos em que o aumento da salinidade foi significativo.

### 3.2 Vazão de extração

Nos últimos 20 anos houve um aumento significativo na área agrícolas dentro do Assentamento Rural, que atrelado à intensificação do uso agrícola promoveu o aumento nas extrações de água do aluvião (Figura 5).

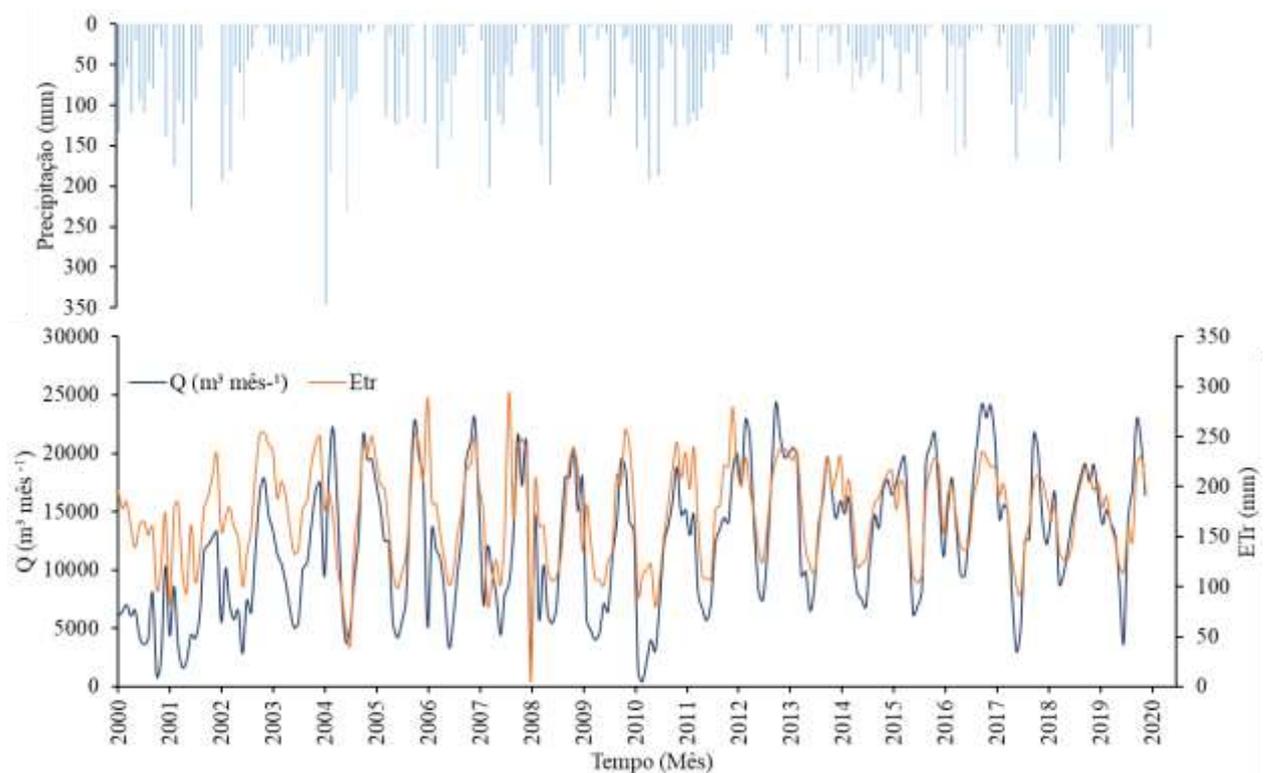


Figura 5 - Vazão de extração, evapotranspiração de referência e precipitação de 2000 a 2019 na Fazenda Nossa Senhora do Rosário.

As taxas explotadas pelo conjunto de poços públicos e cacimbões são bastante variáveis ao longo dos anos, com média de 12.353,8 m³ ano<sup>-1</sup> e máxima de 24.352,0 m³ ano<sup>-1</sup>.

Essa variação se dá em função da disponibilidade de chuvas e do requerimento vegetal, em função da evapotranspiração e da fase fenológica do vegetal.

Nota-se um aumento nas extrações no período mais crítico do ano (agosto a março), relacionado à ausência de precipitação. As áreas agrícolas na estação seca também aumentaram, devido à intensificação das culturas, incluindo hortaliças, pimentão, pastagem e frutíferas constantes ao longo do ano. Penã-Arancibia et al. (2020) atribuem esse aumento à disponibilidade de água subterrânea, o que permite que os agricultores colham mais de uma cultura por ano, e mais de duas no mesmo período. A produção agrícola tem se tornado diversificada nos lotes, e aumentando em escala. Esse aumento, do ponto de vista econômico, é extremamente importante para região; entretanto, no aspecto ambiental, é necessária a adoção de manejos adequados de água e solo, que visem a otimização do uso da água subterrânea para a irrigação.

### **3.3 Estabilidade temporal**

A identificação dos piezômetros estáveis para o valor médio do nível de água e condutividade elétrica foi realizada a partir dos gráficos de estabilidade temporal (Figura 6), em que os piezômetros com diferenças relativas positivas superestimam os valores médios e os negativos subestimam.

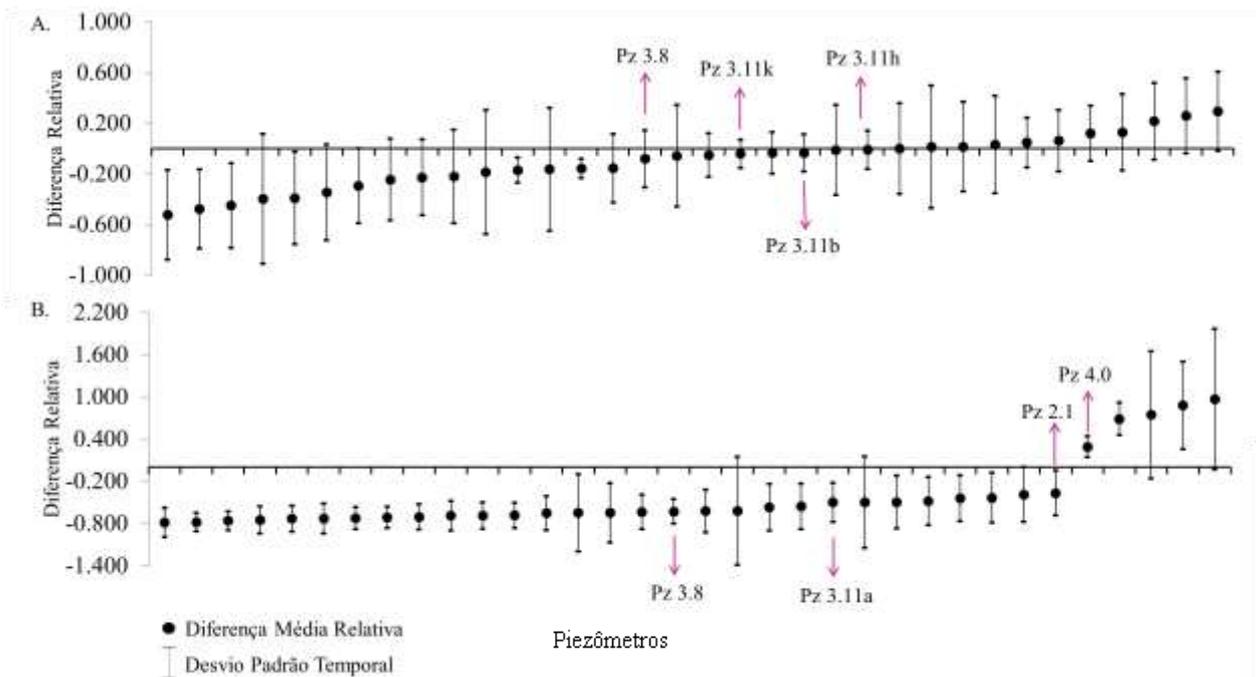


Figura 6 - Diferença média relativa e desvio-padrão temporal para o nível potenciométrico (A) e condutividade elétrica (B).

Os valores destacados na Figura 6 indicam os pontos mais próximos da média em todo o período de tempo avaliado, e as linhas verticais nas figuras expressam o desvio padrão. Em relação ao comportamento dos níveis, os piezômetros que se mostraram representativos foram os Pz 3.8, Pz 3.11b, Pz 3.11h e Pz 3.11k (Figura 6A) apresentando, diferenças relativas médias, em valor absoluto, de 0,016; 0,034; 0,016 e 0,016, respectivamente; e desvios padrão de 17,3; 10; 36,6; 32,6%, respectivamente.

Para a condutividade elétrica, os piezômetros que se mostraram representativos foram os Pz 2.1, Pz 3.11a, Pz 3.8 e Pz 4.0 (Figura 6B) apresentando, diferenças relativas médias, em valor absoluto, de 0,37; 0,50; 0,65 e 0,29, respectivamente; e desvios padrão de 21,4; 22,7; 42,1; 14,9%, respectivamente.

A estabilidade do nível está associada à localização dos piezômetros, conforme análise realizada por Montenegro et al. (2003), ao constatarem que, ao longo do eixo longitudinal do vale aluvial, os piezômetros exibem aproximadamente a mesma dinâmica de flutuação do nível da água ao longo do tempo. O Pz 3.11b está localizado a unidade pedológica RU6, enquanto os demais estão na RU5. Fontes Júnior (2012) e Andrade (2012) identificaram zonas de descarga em RU6 próximas ao contorno Norte do Vale, com lençol freático raso e

apresentando elevada condutividade elétrica. Além disso, a proximidade dos riachos a esses pontos pode influenciar esta estabilidade, por contribuir com recargas laterais provenientes das encostas, que segundo Fontes Júnior et al. (2012), está diretamente associada a estabilidade da sazonalidade dos níveis.

A comparação entre os valores médios de nível de água no aquífero e os pontos estáveis é apresentada na Figura 7, assim como os coeficientes de correlação. Os coeficientes de determinação obtidos consistiram em 0,96; 0,89; 0,91 e 0,21 para o nível dos piezômetros Pz 3.8, Pz 3.11b, Pz 3.11h e Pz 3.11k , respectivamente. Verifica-se que há baixas variações entre os piezômetros estáveis e a média dos demais (Figuras 7B, 7D, 7F e 7H).

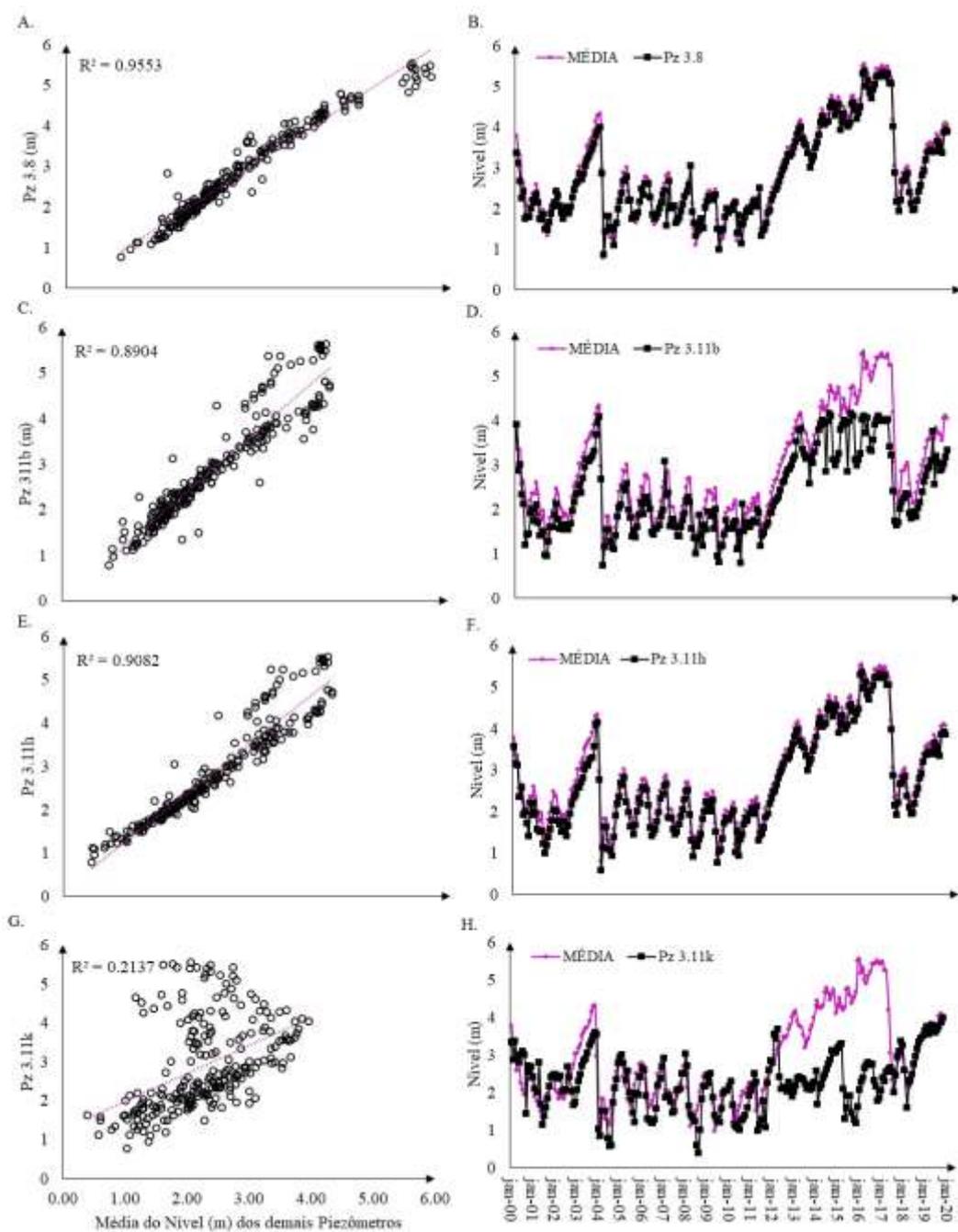


Figura 7 - Correlação entre os dados dos piezômetros estáveis e a média dos demais piezômetros no vale aluvial do Riacho Mimoso e Comparação entre os valores médios de nível de água no aquífero e o ponto estável Pz 3.8 (B), Pz 3.11b (D), Pz 3.11h (F), Pz3.11k (H).

Embora alguns pontos não correspondam exatamente ao valor médio, as diferenças foram mínimas para os Pz 3.8, Pz 3.11b e Pz 3.11h. Segundo Araújo et al. (2019), este resultado indica que, em monitoramentos futuros, esses pontos podem ser adotados como referência para fornecer um valor médio representativo da média geral. Na Figura 7D,

observa-se que nos meses mais secos, o ponto Pz 3.11k não foi capaz de representar a dinâmica média do nível do aquífero, estando atrelado ao distânciamento do mesmo em relação a seção longitudinal do vale aluvial, e a intensificação do uso agrícola e, conseqüentemente, maior extração de água na porção onde está alocado o Pz 3.11k. A correlação entre a condutividade elétrica dos piezômetros Pz 2.1 (A), Pz 3.11a (C), Pz 3.8 (E), Pz 4.0 (G) e a média dos demais piezômetros é apresentada na Figura 8.

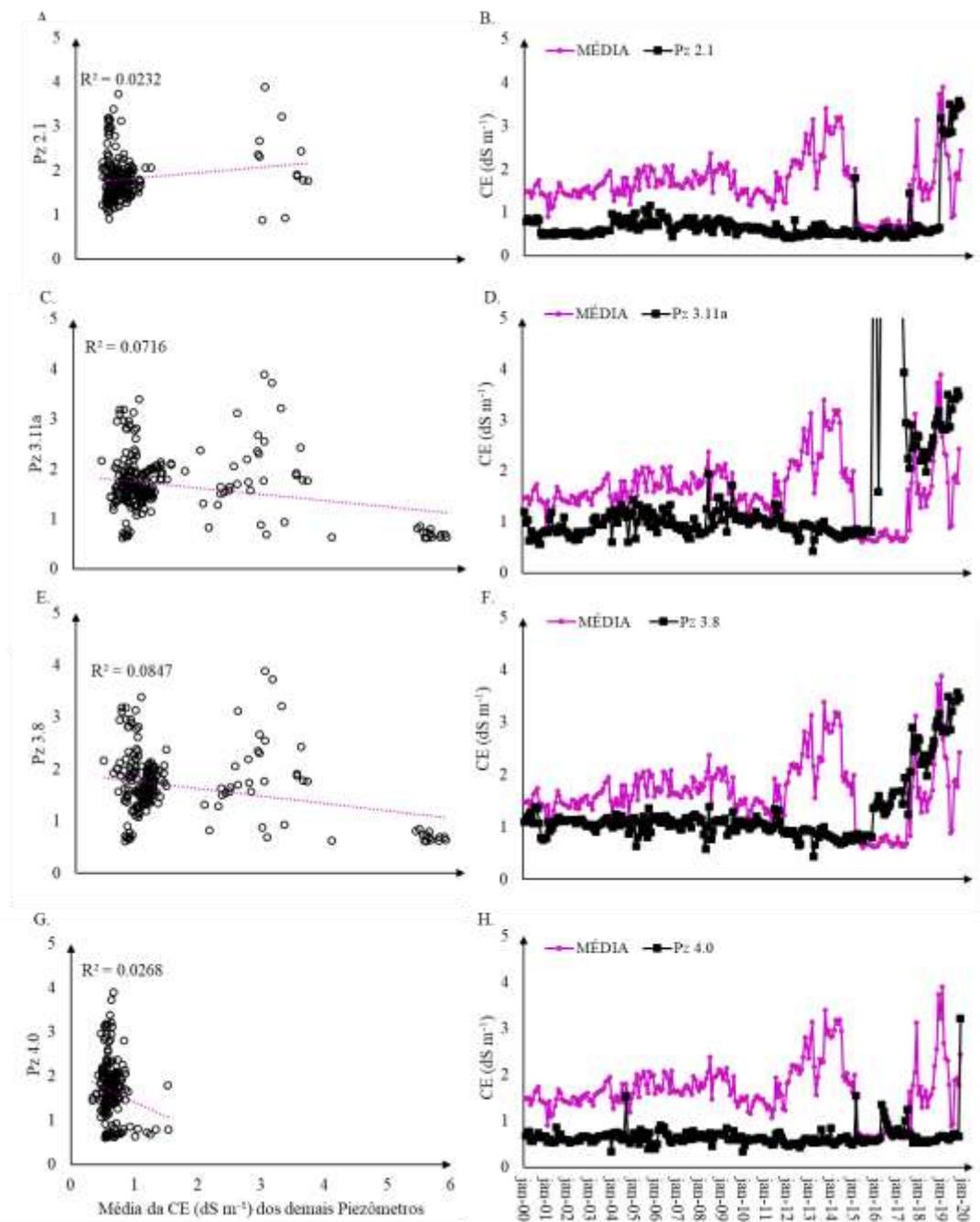


Figura 8 - Correlação entre a condutividade elétrica dos piezômetros Pz 2.1 (A), Pz 3.11a (B), Pz 3.8

(C), Pz 4.0 (D) e a média dos demais piezômetros e Comparação entre a série de valores médios da condutividade elétrica da água subterrânea e a série dos pontos Pz 3.1(A), Pz 3.11a(B), Pz 3.8(C) e Pz 4.0 (D).

Observa-se que os coeficientes de determinação ficaram entre 0,02 e 0,09, não validando os piezômetros como estáveis. Segundo Fontes Júnior et al. (2012), a não validação da estabilidade dos piezômetros em relação à condutividade elétrica pode ser explicada pela baixa amplitude de variação da condutividade elétrica média. Além disso, à baixa circulação hídrica das águas subterrâneas, e as heterogeneidades locais devido ao elevado grau de variabilidade nas características químicas dos solos (ANDRADE et al., 2012) promovem a concentração de sais em pontos isolados do vale aluvial. Se existisse uma boa circulação, as águas se misturariam mais, e atenuaria essas variabilidades, sendo possível então identificar um comportamento médio representativo. No entanto, no cálculo da média das condutividades elétricas a não estacionariedade da salinidade promove uma suavização errônea na variabilidade deste atributo, onde os pontos identificados como estáveis não representam a dinâmica salina do conjunto.

Na Figura 8B, D, F e H encontram-se representadas a comparação entre os valores médios de condutividade elétrica da água subterrânea e os calculados por diferenças relativas. Para todos os pontos analisados, o comportamento da série temporal não correspondeu à dinâmica da série de valor médio. Observa-se ainda que, a série temporal dos pontos analisados estão subestimados em relação à série média. Dentre os fatores que contribuem para a tal comportamento destacam-se os condicionantes geológicos (Fontes Júnior et al, 2012), a influência da textura do solo na lixiviação de sais (MONTENEGRO; MONTENEGRO, 2006) e a intensidade e o manejo da irrigação, os quais podem acelerar o processo de salinização em lotes agrícolas ao longo do vale aluvial.

O desempenho da estabilidade entre os piezômetros selecionados e os demais piezômetros, avaliado através do índice de Willmott, é apresentado na Tabela 1. Os desempenhos obtidos para os níveis foram de péssimo a ótimo, enquanto que para a salinidade os desempenhos foram péssimos. A metodologia de Willmott não possibilitou validar os piezômetros de menor desvio para a condutividade elétrica, corroborando com os resultados encontrados por Fontes Júnior et al. (2012).

Tabela 2 - Desempenho da estabilidade dos piezômetros pelo Índice de Willmott.

Piezômetros avaliados	Índice de Willmott	c	Desempenho
Nível			
Pz 3.8	0,94	0,90	Ótimo
Pz 3.11 b	0,92	0,83	Muito Bom
Pz 3.11 h	0,91	0,87	Ótimo
Pz 3.11 k	0,74	0,15	Péssimo
Salinidade			
Pz 2.1	0,721	0,094	Péssimo
Pz 3.11	0,898	0,092	Péssimo
Pz 4.0	0,989	0,028	Péssimo
Pz 3.8	0,723	0,076	Péssimo

c- índice de desempenho proposto por Camargo & Sentelhas (1997)

Na Figura 9 são apresentadas, através de Box-plot, as médias temporais do nível (A) e da condutividade elétrica (B) dos piezômetros avaliados. Verifica-se que, em relação aos níveis freáticos, ocorreu uma proximidade no valor das medianas entre os pontos, com a presença de *outlier* para o piezômetro estável Pz 3.8. Fontes Júnior et al. (2012), também verificaram a presença de *outliers*, indicando que há relação entre períodos secos e a dispersão dos dados. Em relação a CE (Figura 9B), observa-se também a ocorrência de *outlier* para o piezômetro Pz 4.0, o que pode estar relacionado à maior amplitude desta variável ao longo do tempo.

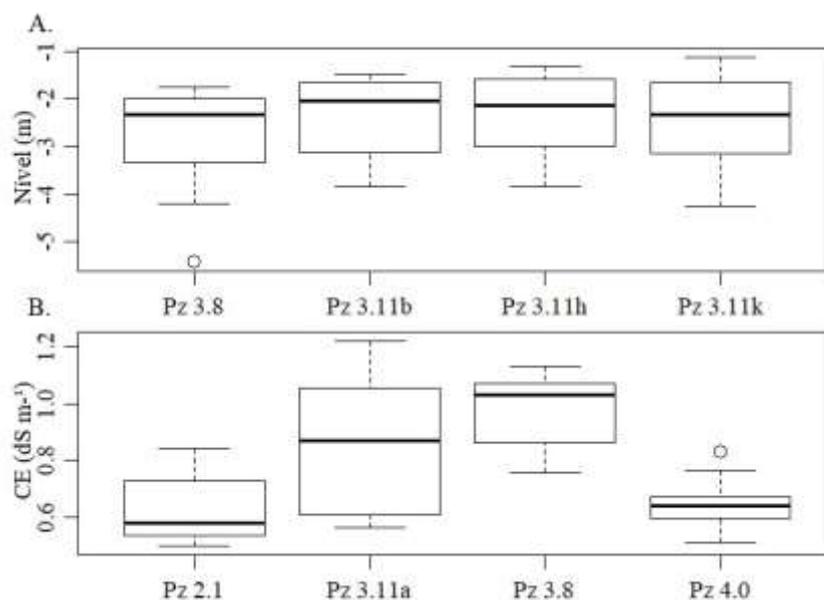


Figura 9 - Box-plot com linhas médias do nível de água (A) e condutividade elétrica (B) para os piezômetros avaliados.

### 3.4 Análise da tendência mensal e anual

Na Tabela 2 observa-se a análise de tendência pelo teste sazonal de MK e a magnitude da inclinação pelo teste de Sen's slope, aplicados às séries temporais de nível de água e de condutividade elétrica dos piezômetros avaliados.

No tocante ao nível de água, os quatro pontos analisados demonstraram, em algum período da análise, tendências sazonais decrescentes. Resultados semelhantes foram encontrados por Ribeiro et al. (2015), ao avaliarem a tendência de séries piezométricas mensais no Rio Elqui (Chile), sendo tais tendências decrescentes consideradas alarmantes, uma vez que na região é esperado aumento na demanda de água e prováveis pressões sobre as águas subterrâneas no futuro.

Os maiores valores de declive foram encontrados para o Pz 3.8, com declive máximo de 0.09 m mês<sup>-1</sup> no mês de maio, seguido de 0,085 e 0,083 m mês<sup>-1</sup> em junho e julho. Este declínio foi tratado por Penã-Arancibia (2020) como um declínio da sazonalidade, em função dos ciclos de recarga-descarga do aquífero. Segundo Monteiro et al. (2014), os períodos mais secos exercem influência nos valores extremos mais baixos dos níveis freáticos, já que existe uma tendência dos aquíferos drenarem para o curso d'água, e serem recarregados posteriormente nas estações chuvosas. Além disso, o déficit pluviométrico aumenta o número

de poços secos (SISHODIA et al., 2016), como verifica-se para os meses de agosto e setembro (Tabela 2), onde a redução na precipitação foi acompanhada por uma tendência de redução nos níveis médios mensais de água subterrânea para a maioria dos piezômetros avaliados.

Tabela 3 - Análise de tendência (indicada por setas) e declives dos níveis dos piezômetros ( $m\ mês^{-1}$ ), da condutividade elétrica ( $dS\ m^{-1}$ ), precipitação ( $mm\ mês^{-1}$ ), temperatura máxima, mínima e média ( $^{\circ}C\ mês^{-1}$ ), evapotranspiração de referência ( $mm\ mês^{-1}$ ) e vazão de extração ( $m^3\ mês^{-1}$ ).

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
<b>A. Nível</b>												
<b>Pz 3.8</b>	↔	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
	-0,052	-0,072	-0,073	-0,094	-0,099	-0,013	-0,085	-0,083	-0,070	-0,062	-0,057	-0,055
<b>Pz 3.11b</b>	↔	↓	↓	↓	↔	↔	↓	↔	↔	↔	↔	↔
	-0,010	-0,047	-0,076	-0,092	-0,087	-0,056	-0,081	-0,101	-0,063	-0,055	-0,040	-0,044
<b>Pz 3.11h</b>	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↓	↓	↔	↔	↓
	-0,040	-0,058	-0,074	-0,072	-0,059	-0,080	-0,089	-0,014	-0,089	-0,076	-0,076	-0,083
<b>Pz 3.11k</b>	↓	↓	↓	↓	↔	↔	↔	↔	↓	↓	↓	↓
	-0,010	-0,067	-0,071	-0,090	-0,083	-0,082	-0,100	-0,091	-0,017	-0,012	-0,083	-0,091
<b>C. Condutividade Elétrica</b>												
<b>Pz 2.1</b>	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔
	-0,010	-0,011	-0,010	-0,003	-0,006	-0,010	-0,010	-0,005	-0,004	-0,001	0,000	0,001
<b>Pz 3.11a</b>	↔	↔	↓	↓	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔
	-0,315	-0,013	-0,014	-0,031	-0,030	-0,017	-0,029	-0,007	-0,013	-0,024	-0,003	0,009
<b>Pz 4.0</b>	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔
	-0,001	0,000	-0,003	0,000	0,000	0,000	-0,003	0,002	-0,003	-0,003	-0,002	0,000
<b>Pz 3.8</b>	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↔	↓	↓	↓
	-0,022	-0,022	-0,026	-0,018	-0,020	-0,019	-0,021	-0,020	-0,016	-0,014	-0,014	-0,019
<b>D. Precipitação, Temperatura e Evapotranspiração de referência</b>												
<b>P</b>	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↓	↓	↑	↔	↓
	0,038	-0,019	0,045	-0,093	0,037	-0,033	-0,060	-0,082	-0,076	0,069	-0,043	-0,038
<b>T<sub>min</sub></b>	↑	↑	↑	↑	↔	↔	↔	↑	↑	↑	↑	↑
	0,086	0,050	0,078	0,088	0,071	0,017	0,027	0,051	0,068	0,095	0,073	0,078
<b>T<sub>máx</sub></b>	↑	↔	↑	↑	↔	↔	↑	↑	↑	↑	↑	↑
	0,086	0,133	0,071	0,124	0,121	0,047	0,155	0,083	0,128	0,133	0,717	0,083
<b>T<sub>méd</sub></b>	↑	↑	↑	↑	↔	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
	0,008	0,098	0,061	0,975	0,107	0,024	0,106	0,079	0,114	0,101	0,072	0,076
<b>ET<sub>0</sub></b>	↑	↔	↔	↔	↑	↔	↔	↔	↑	↑	↑	↑
	0,770	1,343	0,116	1,038	0,0975	1,231	0,629	0,165	0,941	1,161	0,1406	0,727
<b>D. Vazão de Extração</b>												
<b>Q</b>	↑	↔	↑	↔	↑	↑	↔	↑	↑	↑	↑	↔
	375,1	597,1	313,9	521,4	419,8	341,4	259,7	227,4	467,48	366,9	420,6	288,5

↑= tendência ascendente; ↓= tendência decrescente; ↔ = ausência de tendência

As tendências decrescentes atreladas aos meses considerados secos (agosto a março), apresentaram uma forte relação também com a extração de água para irrigação, considerando que a demanda hídrica vegetal aumenta. O ponto Pz 3.11h apresentou tendência decrescente para os meses de agosto, setembro e dezembro, com máxima de 0.089 m/mês em setembro. O

ponto Pz 3.11k apresentou declive em todos os meses do período seco, e no mês de abril, considerado como chuvoso. Tal fato pode estar relacionado às pressões envolvendo a intensificação da atividade agrícola na região.

Avaliando o comportamento sazonal da salinidade, os pontos Pz 2.1 e Pz 4.0 não apresentaram tendência em nenhum período. O maior declive verificado ocorreu em janeiro no Pz 3.11a, com valor de  $0.31 \text{ dS m}^{-1}$  por mês. O Pz 3.8 apresentou tendência decrescente em quase todo o período, com exceção do mês de setembro. Tais declives indicam a redução do teor de sais no aquífero. Tran et al. (2019) também identificaram tendências decrescentes no teor de sais das águas subterrâneas do Vietnã, e segundo os autores, essas tendências estão atreladas ao manejo e uso do solo.

Quanto à precipitação, os meses de agosto, setembro e dezembro apresentaram declive, enquanto o mês de outubro apresentou uma ascensão da lâmina precipitada em  $0,6 \text{ mm/mês}$ . A redução na precipitação é alarmante, já que se configura como o elemento regulador das reservas hídricas em regiões semiáridas (MONTENEGRO et al., 2003). Atrelada a precipitação, a evapotranspiração é um dos componentes críticos do ciclo hidrológico, dada a sua importância para a estimativa da disponibilidade local de água (PAULINO et al., 2019). No presente estudo, a mesma apresentou tendências sazonais crescentes para os meses de janeiro, maio, setembro, outubro, novembro e dezembro, com máxima de  $1.16 \text{ mm mês}^{-1}$  em setembro, seguida de  $1.23 \text{ mm mês}^{-1}$  em maio. A vazão de extração reflete o comportamento da dinâmica evapotranspirativa, apresentando tendências crescentes em janeiro, março, maio, junho, e de agosto a novembro; este último período representa o período seco da região, onde tem se intensificado o cultivo agrícola, refletindo em maior número de horas de bombeamento. Nesse período, foi identificado o aclave máximo de  $467 \text{ m}^3 \text{ mês}^{-1}$  em setembro, coincidindo com o aclave máximo da ETr e declive da P.

As temperaturas mínima, máxima e média apresentaram tendências crescentes na maior parte dos meses avaliados, com valores máximos de aclave de  $0.095^\circ\text{C mês}^{-1}$  (outubro);  $0.717^\circ\text{C mês}^{-1}$  (novembro) e  $0.975^\circ\text{C mês}^{-1}$  (abril), respectivamente. O aumento nas taxas de evapotranspiração é acompanhado pelo aumento da temperatura, como observa-se na Figura 10, onde tendências crescentes significativas foram identificadas em ambas as séries de temperatura.

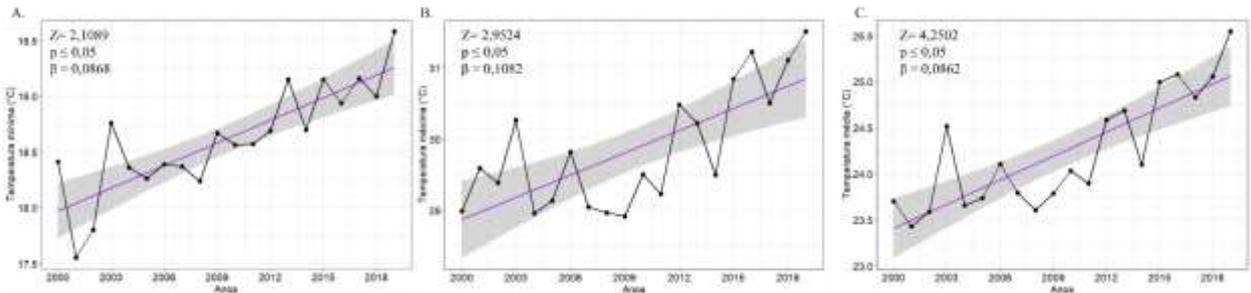


Figura 10 - Séries temporais anuais de temperatura máxima (A), mínima (B) e média (C) no período de 2000 a 2019, com a linha de tendência associada.

As temperaturas mínima, máxima e média apresentaram acíves de 0.086, 0.108 e 0.086, respectivamente. Essas mudanças no padrão de temperatura, foram também encontradas por Carvalho et al. (2020) para toda a região Nordeste, sendo atribuídas principalmente às atividades humanas, particularmente relacionadas a emissões excessivas de gases de efeito estufa. Montenegro e Ragab (2010) constataram que o aumento da temperatura é um dos fatores que podem provocar as alterações na disponibilidade de recursos hídricos, levando à redução da recarga hídrica.

Na Figura 11 é possível observar a série temporal anual de chuvas (A) e evapotranspiração (B) no período de janeiro de 2000 a dezembro de 2019.

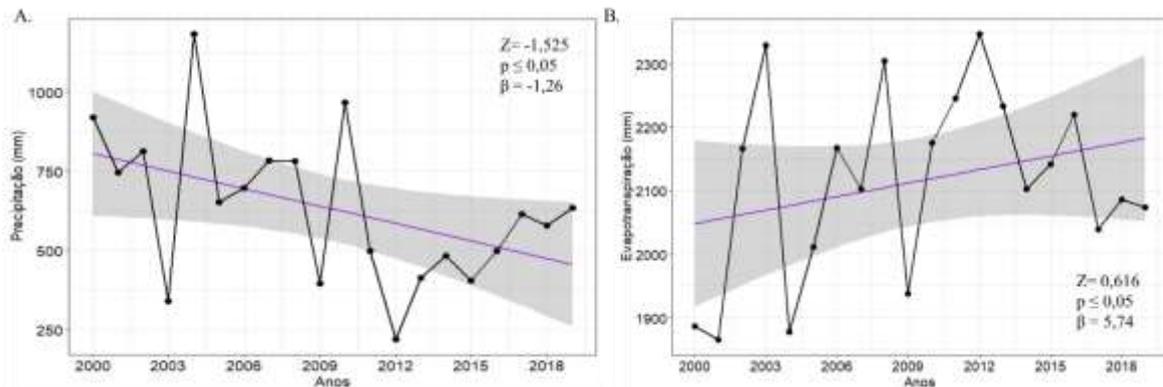


Figura 11 - Séries temporais anuais de chuvas (A) e evapotranspiração de referência (B) no período de 2000 a 2019, com a linha de tendência associada.

Ao longo do período analisado, a precipitação apresentou tendência de diminuição, com declínio anual médio de 12,26 mm/ano. Além disso, uma análise tendência em relação ao número total de dias com chuva, número de dia com chuvas maiores que 5, 10, 15 e 20 mm mostraram que o número total de dias e o número de dias com chuvas maiores que 5 mm

apresentam tendência de redução de 1,87 e 1 dias de chuva por ano, respectivamente. Os resultados encontrados corroboram com Carvalho et al. (2020), onde os autores analisaram a tendência no regime de chuvas, o número de dias chuvosos e a temperatura no Nordeste do Brasil, e identificaram redução nos índices pluviométricos e no número de dias chuvosos para a região semiárida. Tal comportamento pode promover eventos extremos e períodos maiores de seca, quem além de aumentar as crises regionais pela demanda de água podem levar a importantes consequências sociais, econômicas e ambientais (VAZIFEHKHAH; KAYA, 2019; DEL-TORO-GUERRERO; KRETZSCHMAR, 2020;). Essa redução também pode afetar os níveis e a disponibilidade qualitativa das águas subterrâneas (HAAS; BIRK, 2020).

A evapotranspiração de referência apresentou um aumento de 5,7 mm ano<sup>-1</sup>. Tal aumento corrobora com o estudo desenvolvido por Paulino et al. (2019), onde os autores detectaram tendências crescentes em 4,74 mm ano<sup>-1</sup> na ET<sub>0</sub>. Peña-Arancibia et al. (2020) alertam que o aumento na ET<sub>0</sub> deve intensificar a exploração dos aquíferos, já que o uso de águas subterrâneas pode ser considerado como um resultado do aumento da evapotranspiração e da precipitação. Portanto, a demanda por água para irrigação deve aumentar significativamente nas próximas décadas, devido a taxas mais altas de ET<sub>0</sub>.

Na Figura 12 é possível observar a série temporal anual do nível de água subterrânea e da condutividade elétrica para os pontos avaliados no período de 2000 a 2019.

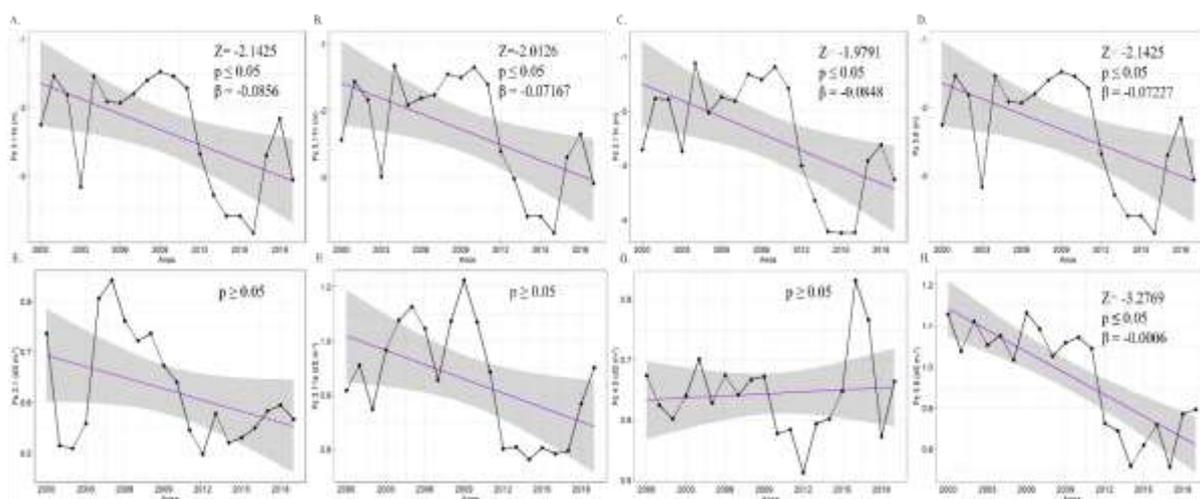


Figura 12 - Séries temporais anuais e linha de tendência associada do nível de água subterrânea nos piezômetros Pz 3.11b (A), Pz 3.11h (B), Pz 3.11k (C), Pz 3.8 (D); e da salinidade nos piezômetros Pz 2.1 (E), Pz 3.11a (F), Pz 4.0 (G), Pz 3.8 (H), para o período de 2000 a 2019.

Verifica-se que o nível de água subterrânea está diminuindo significativamente nos piezômetros avaliados, com decréscimos anuais variando de 0,07 m a 0,08 m por ano. A tendência média é de -0,073 m/ano (Figura 9). Todos os declínios são estatisticamente significativos no nível de significância de 95%, e apresentam valores próximos entre si e da média, o que indica uma efetividade da representação média nos pontos, destacando que a estabilidade é sensível a presença de tendência.

Não houve padrões prontamente aparentes de tendências para a condutividade elétrica quando considerada a nível anual, com exceção para o ponto Pz 3.8, o qual apresentou um declive de 0.0006 dS m<sup>-1</sup> ao ano. Na Figura 13, observa-se o comportamento médio anual das variáveis Nível, CE e Q.

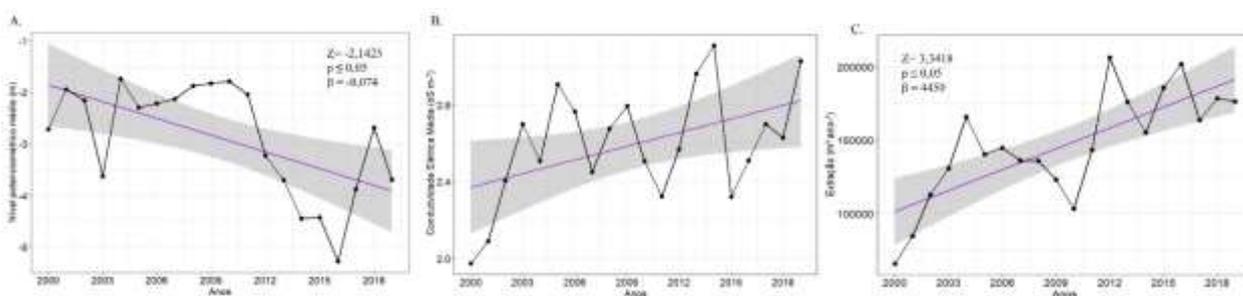


Figura 13 - Séries temporais anuais e linha de tendência associada das médias gerais do nível de água subterrânea (A) e da condutividade elétrica (B) e vazão de extração (C) para o período de 2000 a 2019.

Os níveis de água subterrânea apresentam tendência de redução de 0,07 m ao ano. Hass e Bik (2019) e Hasda et al. (2020) atrelam essa diminuição ao uso excessivo da água considerando principalmente as extrações para fins agrícolas. Enquanto, Hu et al. (2019) e Bibi et al. (2019), relacionam as reduções aos efeitos das mudanças climáticas.

Verifica-se que não há tendência para os valores médios de CE. A CE, especialmente neste aquífero, é uma variável que apresenta uma alta variação no espaço e no tempo (Andrade et al., 2012), sendo sensível a diversos fatores como a ocorrência de condicionantes geológicos e a existência de regiões de descarga, o que impede a identificação de tendência à nível médio anual.

As extrações apresentaram uma tendência crescente de 4.450 m<sup>3</sup> ao ano. Monteiro et al. (2014), avaliando o vale aluvial em estudo, concluíram que a condição de bombeamento adotada pelos agricultores, não apresentava risco significativo que comprometesse o potencial hídrico subterrâneo. No presente estudo, valores semelhantes foram encontrados quanto ao

rebaixamento, corroborando com Monteiro et al. (2014). No entanto, dada a importância da produção agrícola nessa região e as tendências de declínio dos níveis de água do aquífero, esse incremento na vazão de extração alerta para um possível colapso no sistema de armazenamento do aquífero.

#### **4 CONCLUSÕES**

1. Verificou-se a ocorrência de estabilidade temporal para o nível potenciométrico no vale aluvial do Riacho Mimoso, sendo possível identificar piezômetros que representam adequadamente a média ao longo do tempo. Entretanto, não houve estabilidade temporal para a condutividade elétrica.
2. Foram identificadas tendências sazonais decrescentes nos níveis freáticos durante o período seco, sendo tais tendências relacionadas à descarga natural do aquífero, bem como às altas extrações de água para irrigação nesta região.
3. Não foi possível identificar um padrão anual de comportamento para a variação na condutividade elétrica.
4. Foram identificadas tendências crescentes na temperatura, evapotranspiração e reduções na precipitação anual, o que serve como alerta para o possível aumento na exploração dos recursos hídricos subterrâneos.
5. Verificou-se um aumento na vazão de extração de água dos poços, sendo influenciada pelo aumento na taxa de evapotranspiração e intensificação das atividades agrícolas nos lotes irrigados, que atrelado a tendência decrescente de água disponível no aquífero, alerta para um colapso no armazenamento da água subterrânea.
6. Os resultados encontrados neste estudo podem ser extremamente importantes para o gerenciamento e planejamento de ações presentes e futuras que visem a gestão de águas subterrâneas no semiárido.

#### **REFERÊNCIAS**

Abdullahi, M.G.; Toriman, M.E; Gasim, M.B.; Garba, I. Trends Analysis of Groundwater: Using Non-Parametric Methods in Terengganu Malaysia. **Journal of Earth Science and Climatic Change**, v.6, p.1-15, 2015.

Andrade, T. S.; Montenegro, S. M. G. L.; Montenegro, A. A. A.; Rodrigues, D. F. B. Estimation of alluvial recharge in the semiarid. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola**, v. 34, n. 2, p. 211-221, 2014.

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.

Araújo, D.C. DOS S.; Montenegro, S.M.G.L.; Montenegro, A.A. A.; Santos, D.P.; Rodrigues, R.A. S. Temporal stability of soil moisture in banana cropping area in the Brazilian semiarid region. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.23, p.852-859, 2019.

Bibi, S.; Wang, L.; Li,X.; Zhang, Z.; Chen, D. Response of Groundwater Storage and Recharge in the Qaidam Basin (Tibetan Plateau) to Climate Variations From 2002 to 2016. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v.124, p.1-17, 2019.

Boufekane, A.; Saighi, O. Assessing groundwater quality for irrigation using geostatistical method- Case of wadi Nil Plain (North-East Algeria). **Groundwater for Sustainable Development**, v.8. p179-186, 2019.

Camargo, F. J. A.; Sentelhas, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.5, p.89-97, 1997.

Carvalho, A.A.; Montenegro, A.A.A.; Silva, H. P.; Lopes, I.; Morais, J. E. F.; Silva, T.G.F. Trends of rainfall and temperature in Northeast Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.24, p.15 - 23, 2020.

Coelho, V. H. R.; Montenegro, S. M. G. L.; Almeida, C. N.; Silva, B. B.; Oliveira, L. M. M.; Gusmao, A. C. V.; Freitas, E. S.; Montenegro, A. A. A. Alluvial groundwater recharge estimation in semi-arid environment using remotely sensed data. **Journal of Hydrology**, v. 548, p.1-15, 2017.

Corrêa, M. M; Ribeiro, M. R. Levantamento detalhado de solos da Fazenda Nossa Senhora do Rosário (Pesqueira-PE). Recife: UFRPE/UFPE/CNPq/BNB. 2001. 35p. Relatório Técnico

Del-Toro-Guerrero, F.J.; Kretschmar, T. 2020. Precipitation-temperature variability and drought episodes in northwest Baja California, México. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v.27, p.1-14.

Fontes Júnior, R.V.P.; Montenegro, A.A.A.; Montenegro, S.M.G.L.; Santos, T.E.M. Estabilidade temporal da potencialidade e da salinidade no vale aluvial no semárido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.11, p.1188-1197, 2012.

Fontes Júnior, R.V.P.; Montenegro, A.A.A. Temporal dependence of potentiometric levels and groundwater salinity in alluvial aquifer upon rainfall and evapotranspiration. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.22, n.54, 2017.

Gribilla, A.; Anournu, G.; Adomaki, D. Trend analysis and ARIMA modelling of recent groundwater levels in the White Volta River basin of Ghana. **Groundwater for Sustainable Development**, v.6, p.150-163, 2018.

Haas, J.C.; Birk, S. Trends in Austrian groundwater – Climate or human impact? **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v.22, p.1-17, 2019.

Hu, K.X.; Awange, J.L.; Kuhn, M.; Saleem, A. Spatio-temporal groundwater variations associated with climatic and anthropogenic impacts in South-West Western Australia. **Science of the Total Environment**, v.696, p.1-18, 2019.

Kaown, D.; Hyun, Y.; Bae, G.O.; Oh, C.W.; Lee, K.K. Evaluation of spatio-temporal trends of groundwater quality in different land uses using Kendall test. **Geosciences Journal**, v.16, n.1, 65–75, 2012.

Kath, J.; Dyer, F.J. Why groundwater matters: an introduction for policy-makers and managers. **Policy Studies**, v.38, p.447-461, 2018.

Kisi, O.; Ay, M. Comparison of Mann–Kendall and innovative trend method for water quality parameters of the Kizilirmak River, Turkey. **Journal of Hydrology**, v.513, p.362–375, 2014.

Kumar, S.; Sangeetha, B. Assessment of ground water quality in Madurai city by using geospatial techniques. **Groundwater for Sustainable Development**, v.10, p.1-6, 2020.

Le Brocque, A.F., Kath, J., Reardon-Smith, K. Chronic groundwater decline: A multi-decadal analysis of groundwater trends under extreme climate cycles. **Journal of Hydrology**, v.561, p.976-986, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.04.059>

Mackay, R.; Montenegro, A. A. A.; Montenegro, S.M.G.L. Wonderen, J. v. Alluvial Aquifer Indicators for small-scale irrigation in Northeast Brazil **In: Webb, B., Hirata, R., Kruse, E., Sustainability of Groundwater Resources and Indicators-** Red Book IAHS Publ. 302., Wallinford, v.1. p.1–9, 2005

Mann, H.B., 1945. Nonparametric tests against trend. **Econometrica**, n.13, p.245–259.

Moghazy, N.H.; Kaluarachchi, J.J. Assessment of groundwater resources in Siwa Oasis, Western Desert, Egypt. **Alexandria Engineering Journal**, v.59, p.149-163, 2020.

Monteiro, A. L. N.; Montenegro, A. A. A.; Montenegro, S. M. G. L. Modelagem de fluxo e análise do potencial hídrico de aquífero aluvial no semiárido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 3, p. 151-163, 2014. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v19n3.p151-163>.

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

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**, v.10, p.30-37, 2006.

Montenegro, A. A. A.; Ragab, R. Hydrological response of a Brazilian semiarid catchment to different land use and climate change scenarios: modeling study. **Hydrological Processes**, v.24, p.2705-2723, 2010.

Montenegro, S. M. G. L.; Montenegro, A. A. A.; Mackay, R.; Oliveira, A. S. C. Dinâmica hidro-salina em aquífero aluvial utilizado para agricultura irrigada familiar em região semiárida. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.8, p.85-92, 2003.

Panzand, K.; Khosravi, D.; Ghaderi, M.R.; Rezvanianzadeh, M.R. Identification of the hydrogeochemical processes and assessment of groundwater in a semi-arid region using major ion chemistry: A case study of Ardestan basin in Central Iran. **Groundwater for Sustainable Development**, v.6, p.245-254, 2018.

Paulino, C.E.N.; Studart, T.M.C.; Campos, J.N.B.; Petana, C.J.; Lun, R.M.; Alves, J.M.B. Trends in Crop Reference Evapotranspiration and Climatological Variables Across Ceará State – Brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 34, n. 1, p.79- 88, 2019.

Peña-Arancibia, J.L.; Mainuddin, M.; Ahmad, M.D.; Hodgson, G.; Murad, K.F.I.; Ticehurst, C.; Maniruzzaman, M.; Mahboob, M.G.; Kirby, J.M. Groundwater use and rapid irrigation expansion in a changing climate: Hydrological drivers in one of the world's food bowls. **Journal of Hydrology**, v.581, p.1-16, 2020.

Ran, Y.; Li, X.; Ge, Y.; Lu, X.; Lian, Y. Optimal selection of groundwater-level monitoring sites in the Zhangye Basin, Northwest China. **Journal of Hydrology**, v.525, p.209–215, 2015.

Ribeiro, L.; Kretschmer, N.; Nascimento, J.; Buxo, A.; Rotting, T.; Soto, G; Señoret, M.; Oyarzún, J.; Maturana, H.; Oyarzún, R. Evaluating piezometric trends using the Mann-Kendall test on the alluvial aquifers of the Elqui River basin, Chile. **Hydrological Sciences Journal**, v.60, n.10, p.1840-1852, 2015.

Rotting, T.; Soto, G; Señoret, M.; Oyarzún, J.; Maturana, H.; Oyarzún, R. Evaluating piezometric trends using the Mann-Kendall test on the alluvial aquifers of the Elqui River basin, Chile, **Hydrological Sciences Journal**, v.60, n.10, p.1840-1852, 2015.

Santos, E.S. ; Silva, E.F.F. ; Montenegro, A.A.A. ; Souza, E. S. ; Souza, R. M. S. ; Silva, R.I.J. . Produtividade do pimentão sob diferentes lâminas de irrigação e doses de potássio em região semiárida. **Irriga**, v.23, p.518-534, 2018.

Sen, P.K., Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. **Journal of the American Statistical Association**, v.63, n.324, p.1379–1389, 1968.

Sishodia, E.P.; Shukla, S.; Graham, W.D.; Wani, S.P.; Garg, K.K. Bi-decadal groundwater level trends in a semi-arid southindian region: Declines, causes and management Rajendra. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v.8, p.43–58, 2016.

Skrzypek, G.; Dogramaci, S.; Rouillard, A.; Grierson, P.F. Groundwater seepage controls salinity in a hydrologically terminal basin of semi-arid northwest Australia. **Journal of Hydrology**, v.542, p.627-636, 2016.

Tran, T.V.; Tran, D.X.; Myint, S.W.; Huang, C.; Pham, H.V.; Luu, T.H.; Vo, T.M.T. Examining spatiotemporal salinity dynamics in the Mekong River Delta using Landsat time series imagery and a spatial regression approach. **Science of the Total Environment**, v.687, p.1087–1097, 2019.

Vachaud, G.; Silans, A. P.; Balabanis, P.; Vauclin, M. Temporal stability of spatially measured soil water probability density function. **Soil Science Society of America Journal**, v.49, p.822- 827, 1985.

Vazifehkhah, S.; Kahya, E. Hydrological and agricultural droughts assessment in a semi-arid basin: Inspecting the teleconnections of climate indices on a catchment scale. **Agricultural Water Management**, v.217, p.413–425, 2019.

Willmott, C. J.; Robeson, S.M.; Matsuura, K. A refined index of model performance. **International Journal of Climatology**, v.32, p.2088-2094, 2012.

Yang, J.; Ye, M.; Tang, Z.; Jiao, T.; Song, X.; Pei, Y.; Liu, H. Using cluster analysis for understanding spatial and temporal patterns and controlling factors of groundwater geochemistry in a regional aquifer. **Journal of Hydrology**, n.583, p.1-15, 2020.

### CAPÍTULO III

---

Almeida, T. A. B. Variabilidade espaço-temporal da salinidade e sodicidade em vale aluvial na região semiárida de Pernambuco. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2020.

#### Resumo

No semiárido brasileiro, os aquíferos aluviais são estratégicos para o desenvolvimento e manutenção das comunidades agrícolas. Entretanto, as restrições no uso e na disponibilidade das águas subterrâneas nos aluviões estão diretamente ligadas à sazonalidade e à variabilidade espacial de seus níveis de salinidade. Desta forma, buscou-se avaliar a variabilidade espacial e temporal da condutividade elétrica e da razão de adsorção de sódio da água subterrânea utilizada para irrigação em um assentamento rural, no semiárido pernambucano. Para isso foram coletadas amostras de água subterrânea de 56 pontos de monitoramento, no vale aluvial do Mimoso, Pesqueira-PE no período de janeiro a dezembro de 2019. Foram realizadas análises químicas das águas subterrâneas dos principais cátions  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ , e avaliados a dureza total (DT) e o percentual de sódio (PS) das amostras. A condutividade elétrica (CE) e a razão de adsorção de sódio (RAS) foram usadas como indicadores para determinar a adequação das águas subterrâneas para fins de irrigação. Técnicas estatísticas descritivas e geoestatísticas foram aplicadas para identificação dos padrões de variabilidade espaço-temporal e dependência espacial da CE e da RAS, visando ao mapeamento da salinidade e sodicidade da água subterrânea. Adicionalmente, foi realizada a interseção entre as duas variáveis e a elaboração de uma variável indicadora da adequação da água para irrigação. As concentrações de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$  representam em média 38,4%, 38,3%, 13,8% e 9,4% de todos os cátions, respectivamente. Os valores dos indicadores CE, DT, PS e RAS variaram de 0,35-25,78  $\text{dS m}^{-1}$ , 87,2-124,9  $\text{mg L}^{-1}$ , 14,2-18,2 % e 0,08-35,1 ( $\text{mmol L}^{-1}$ )<sup>0,5</sup>, respectivamente. As águas subterrâneas foram consideradas adequadas para uso agrícola na maioria dos locais. Verificou-se que a condutividade elétrica possui variabilidade média a alta, com dependência espacial variando de forte a moderada, e que a textura do solo, regime pluviométrico e explorações influenciam na variação espacial e temporal desta variável. A sodicidade apresentou variabilidade de média a alta, com forte dependência espacial, e forte correlação com a CE, sendo influenciada pelas mesmas variáveis mencionadas para a CE. O mapa de qualidade obtido para irrigação permitiu a identificação de áreas e períodos que

apresentam água em condições adequadas para a irrigação, e esta ferramenta é de fundamental importância para os gestores e agricultores na tomada de decisão quanto ao uso de água para irrigação agrícola.

**Palavra-chave:** Condutividade Elétrica, RAS, Água Subterrânea, Geoestatística

Almeida, T. A. B. Spatio-temporal variability of salinity and sodicity in an alluvial valley in the semiarid region of Pernambuco. Thesis (Master's degree in Agricultural Engineer) – Federal Rural University of Pernambuco, 2020.

### **Abstract**

In the Brazilian semiarid, alluvial aquifers are strategic for the development and maintenance of agricultural communities. However, restrictions on the use and availability of groundwater in these reservoirs are directly linked to seasonality and the spatial variability of its salinity levels. Thus, it was sought to evaluate the spatial and temporal variability of electrical conductivity and the sodium adsorption ratio of groundwater used for irrigation in a rural settlement, in the Pernambuco semiarid region. For this purpose, groundwater samples were collected from 56 monitoring sites in the alluvial aquifer of Mimoso, Pesqueira-PE from January to December 2019. Chemical analyzes of the groundwater of the main cations  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Mg}^{2+}$  were carried out and the total hardness (DT) and the percentage of sodium (PS) of the samples were evaluated. Electrical conductivity (CE) and sodium adsorption ratio (RAS) were used as indicators to determine the suitability of groundwater for irrigation purposes. Descriptive and geostatistical statistical techniques were applied to identify the patterns of spatio-temporal variability and spatial dependence of CE and RAS, aiming at mapping the salinity and sodicity of groundwater. Additionally, the intersection between the two variables was performed and a variable was developed to indicate the suitability of water for irrigation. The concentrations of  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  and  $\text{K}^+$  represent on average 38.4%, 38,3%, 13,8% and 9,4% of all cations, respectively. The values of the CE, DT, PS and RAS indicators ranged from 0,35-25,78  $\text{dS m}^{-1}$ , 87.2-124.9  $\text{mg L}^{-1}$ , 14,2-18,2% and 0,08- 35,1  $\text{mg L}^{-1}$ , respectively. Groundwater was considered suitable for agricultural use in most locations. It was found that electrical conductivity has medium to high variability, with spatial dependence varying from strong to moderate, and that soil texture, rainfall and exploitation influence the spatial and temporal variation of this variable. Sodicity showed medium to high variability, with strong spatial dependence, and strong correlation with the CE, being influenced by the same variables mentioned for the EC. The quality map obtained for irrigation allowed the identification of areas and periods that present water in conditions suitable for irrigation, and this tool is of fundamental importance for managers and farmers in making decisions regarding the use of water for agricultural irrigation.

**Keyword:** Electrical Conductivity, SAR, Groundwater, Geoestatistic

## 1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas e o crescimento populacional estão exercendo pressões cada vez maiores sobre os recursos hídricos em regiões semiáridas (MAHMOUD et al., 2011). Nessas regiões a evapotranspiração ultrapassa a precipitação, o que dificulta a disponibilidade superficial de água ao longo do ano e promove um déficit hídrico, sendo necessária a aplicação de água via irrigação. Segundo Tomaz et al. (2020), o aumento da aridez climática está levando a maiores necessidades de água das culturas, tornando a rede de irrigação mais densa para combater a baixa disponibilidade de água.

Nas regiões semiáridas, a água subterrânea é a principal fonte de água disponível, tornando-se vital para o desenvolvimento da região (LI et al., 2018). Para Patel et al. (2020), a dependência da agricultura, na região semiárida, em relação às águas subterrâneas e o uso irrestrito deste recurso, pode causar exaustão na recarga dos aquíferos e a qualidade da água. A disponibilidade qualitativa e quantitativa deste recurso é influenciada pelas altas variações climáticas, atividades agrícolas e bombeamentos (JAMAA et al., 2020). Montenegro e Montenegro (2006) apontam que os vales aluviais do semiárido apresentam um elevado potencial para a pequena agricultura irrigada, no entanto, são susceptíveis ao acúmulo de sais, tanto na zona não-saturada quanto na saturada, a depender, dentre outros fatores, da distribuição espacial de suas características hidráulicas.

Os problemas de salinização das águas subterrâneas em regiões semiáridas são questões críticas ambientais e socioeconômicas recorrentes. Esse problema pode ser atribuído a fatores naturais, como a interação da água com as rochas, condições hidrodinâmicas, eventos climáticos de precipitação e evapotranspiração, além das atividades antrópicas de superexploração dos recursos subterrâneos e manejos incorretos da irrigação (MASOUD et al., 2018; RIVETT et al., 2019; FARAJ et al., 2020). Para Panzand et al. (2018), as abstrações excessivas de águas subterrâneas nas últimas décadas têm provocado um decaimento no índice de qualidade na água, e os autores alertam para a escassez de estudos acerca da disponibilidade de água adequada para irrigação. Andrade et al. (2012) destacaram a variabilidade sazonal na qualidade da água subterrânea nos vales aluviais do semiárido devido à influência dos condicionantes hidrológicos e climáticos, indicando o efeito da diluição dos sais pela recarga pluviométrica, e o efeito de concentração dos sais pela evaporação acentuada da água no período seco.

O processo de salinização das águas subterrâneas cria um risco para a saúde humana e tem um enorme efeito sobre o meio ambiente (PATTNAIK; REDDY, 2009; KUMAR; SANGEETHA, 2020). Tal processo causa impactos prejudiciais em inúmeras áreas produtivas, incluindo a infertilidade dos solos agrícolas (IELPO et al., 2017). A irrigação de solos com baixa permeabilidade, usando água salina, pode levar a um acúmulo lento, mas progressivo e excessivo de sais nos solos (MASOUD et al., 2018).

A qualidade da água de irrigação depende de vários tipos de sais que constituem a salinidade e a sodicidade da água (PATEL et al., 2020). A condutividade elétrica (CE) é um dos melhores e mais eficientes indicadores do grau de salinidade da água, e junto a ele, a razão de adsorção de sódio (RAS) é o indicador mais utilizado para avaliar a adequação da para a irrigação (BOUFEKANE; SAIGHI, 2019). Ambos indicadores são muito importantes na classificação da água sob o ponto de vista agrícola. A CE indica a quantidade total de íons dissolvidos na água, enquanto a RAS é uma medida da preponderância relativa de sódio dissolvido na água em comparação com as quantidades de cálcio e magnésio dissolvidos (DELBARI et al., 2013)

O gerenciamento eficaz e a sustentabilidade agrícola exigem que as variações espaciais na qualidade das águas subterrâneas e seus fatores de controle sejam compreendidos (MASOUD et al., 2018). Muitos pesquisadores estão utilizando amplamente a geoestatística para a estimativa espacial dos parâmetros das águas subterrâneas (BODRUD-DOZA et al., 2016). Delbari et al. (2016) aplicaram o método de krigagem por indicadores para identificar as áreas mais adequadas para a implementação de sistemas de irrigação em termos de qualidade da água no Sul do Irã, onde destacaram a eficiência na técnica geoestatística para a avaliação espacial da qualidade das águas subterrâneas através do mapeamento da CE e RAS, sendo útil para um gerenciamento adequado dos recursos subterrâneos. Mais recentemente, Boufekane e Saighi (2019) utilizaram o método geoestatístico para estabelecer a distribuição espacial dos parâmetros de qualidade das águas subterrâneas no Nordeste da Argélia, onde foi possível identificar o nível de adequação das águas subterrâneas através da interseção entre os mapas de co-krigagem de CE e RAS.

O vale aluvial do Riacho do Mimoso, semiárido do Nordeste brasileiro, está sob o assentamento rural Nossa Senhora do Rosário, onde a agricultura é praticada em pequena escala, utilizando-se irrigação com águas subterrâneas. Autores como Andrade et al. (2012) e Montenegro e Montenegro (2006) buscaram avaliar a dinâmica salina do aquífero e a sua

variação espaço-temporal, com a aplicação de técnicas geoestatísticas, e identificaram padrões de variabilidade e dependência espacial na condutividade elétrica. Fontes Júnior e Montenegro (2017), também utilizando o método geoestatístico, identificaram alta incerteza na dependência temporal da salinidade, correlacionando-a com eventos de recarga e períodos de elevada evapotranspiração.

O objetivo do presente estudo consiste em avaliar a qualidade das águas subterrâneas do Vale Aluvial do Mimoso através da condutividade elétrica (CE) e da razão de adsorção de sódio (RAS), a fim de identificar áreas com qualidade adequada para agricultura, usando os métodos geoestatísticos (krigagem).

## **2 MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1 Área de Estudo**

O Vale Aluvial do Riacho Mimoso está localizado na Bacia do Alto Ipanema, distando 22 km da sede do município de Pesqueira – PE, e 270 km da cidade do Recife – PE. Suas terras se distribuem ao longo do terraço aluvial do Rio Ipanema em uma estreita faixa, sendo limitado por encostas do embasamento cristalino, relativamente raso, abrangendo 100 a 136 ha (CORRÊA; RIBEIRO, 2001).

O aquífero estudado possui espessura média em torno de 10 m, cerca de 3 km de extensão e 300 m de largura, e um declive topográfico natural de aproximadamente 0,3% (Oeste – Leste) (MONTENEGRO et al., 2003), induzindo um fluxo subterrâneo natural na mesma direção e sentido. O vale possui uma rede de poços e piezômetros utilizados para o monitoramento mensal contínuo da água subterrânea.

As principais culturas exploradas nos lotes são: 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*).

### **2.2 Monitoramento das variáveis climáticas**

A precipitação (P) foi medida por uma estação meteorológica automática da *Campbell Scientific* instalada no vale aluvial. A evapotranspiração de referência (ET<sub>0</sub>) foi obtida utilizando-se dados climatológicos registrados na estação automática e calculada de acordo com o método de Penman-Monteith da FAO.

### 2.3 Determinação da salinidade e sodicidade

Para o presente estudo utilizou-se amostras coletadas em 36 piezômetros e 15 poços tipo Amazonas, no período de janeiro a dezembro de 2019. As amostras de água coletadas, e transferidas para um recipiente hermeticamente vedado e acondicionadas em caixa térmica para serem transportadas ao Laboratório de Água e Solo (LAS), da Universidade Federal Rural de Pernambuco, onde foi realizada a leitura da condutividade elétrica (CE) com o auxílio de um condutivímetro (HANNA-HI 9835) ajustado à temperatura da amostra. Os teores de  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$  foram determinados por fotometria de emissão de chamas e teores de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  por titulação em EDTA após a amostra ter sido tamponada, para os meses de maio a novembro.

A dureza total das águas foi calculada através da Equação 1, proposta por Sawyer e McCarthy (1967).

$$DT = (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) + 50 \quad (1)$$

Onde:  $\text{Ca}^{2+}$  = concentração de cálcio em  $\text{mmol}_c\text{L}^{-1}$ ;  $\text{Mg}^{2+}$  = concentração de magnésio em  $\text{mmol}_c\text{L}^{-1}$ .

Os resultados de DT são categorizados em quatro níveis de restrição, conforme Sawyer e McCarthy (1967): leve ( $DT < 75$ ); moderada ( $75 < DT < 150$ ); alta ( $150 < DT < 300$ ) e muito alta ( $DT > 300$ ).

O parâmetro percentual de sódio (PS) foi utilizado para avaliar a conformidade da água para usos agrícolas, sendo determinado pela Equação 2 (TODD, 1960), em que todas as variáveis são expressas em  $\text{mmol}_c\text{L}^{-1}$ .

$$PS = \frac{\text{Na}^+}{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+ + \text{K}^+} \times 100 \quad (2)$$

onde,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  correspondem as concentrações de sódio de potássio, potássio, cálcio e magnésio na água, respectivamente, em  $\text{mmol}_c\text{L}^{-1}$ .

Os resultados do PS são classificados em cinco grupos: nenhum ( $PS < 20$ ); leve ( $20 < PS < 40$ ); moderado ( $40 < PS > 60$ ); alto ( $60 < PS < 80$ ) e muito alto ( $PS > 80$ ).

Para efeito de classificação da qualidade da água subterrânea, foi usada como referência a classificação preconizada por Ayers & Westcot (1999). A classificação da água de irrigação foi realizada em conformidade com a RAS em  $(\text{mmol}_c\text{L}^{-1})^{0,5}$  (Richards, 1954), como apresenta a Equação 3.

$$\text{RAS} = \left[ \frac{\text{Na}}{\sqrt{\frac{\text{Ca} + \text{Mg}}{2}}}} \right] \quad (3)$$

onde,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  correspondem as concentrações de sódio de potássio, potássio, cálcio e magnésio na água, respectivamente, em  $\text{mmol}_c\text{L}^{-1}$ .

De acordo com os valores de RAS, as águas de irrigação são classificadas em quatro grupos: nenhuma ( $\text{RAS} < 10$ ); leve ( $10 < \text{RAS} < 18$ ); moderada ( $18 < \text{RAS} < 26$ ) e alta ( $\text{RAS} > 26$ ).

A classificação da água de irrigação seguiu o modelo proposto pelo Laboratório de Salinidade dos Estados Unidos (ADIMALLA, 2019), denominado de diagrama de Richards (1954). Para essa classificação, são utilizados os valores dos parâmetros de condutividade elétrica (risco de salinidade) e da relação de absorção do sódio, RAS (risco de adsorção de sódio). Os valores dos parâmetros são plotados no diagrama, o qual é subdividido em quatro níveis, permitindo a classificação das amostras de água. Na Tabela 1 encontra-se a interpretação das classes do diagrama, baseado em Richards (1954).

Tabela 1 - Classificação da água conforme Richards (1954)

Salinidade		Sodicidade	
	Pode ser utilizada na maioria das culturas e em muitos tipos de solos		Pode ser utilizada em quase todos os tipos de solo
C1	Baixa	S1	Baixa
	Pode ser utilizada, desde que ocorra moderada lixiviação dos sais no solo		Pode causar risco de sodicidade de solos de textura fina e de baixas taxas de lixiviação
C2	Média	S2	Média
	Não deve ser utilizada em solos com restrição de drenagem		Pode produzir níveis perigosos de sódio trocável na maior parte do solo
C3	Alta	S3	Alta
	Não é adequada para irrigação		Inadequada para a irrigação, exceto quando a salinidade for baixa ou média
C4	Muito Alta	S4	Muito Alta

## 2.4 Análise estatística e geoestatística

Os dados foram analisados de acordo com a estatística clássica, para verificação de seu comportamento quanto às medidas estatísticas de posição e de variabilidade, com auxílio de planilha eletrônica. Foi avaliada a distribuição dos dados em relação à distribuição Normal, utilizando-se o teste de Kolmogorov-Smirnov, ao nível de probabilidade de 0,05. De acordo com os valores do coeficiente de variação (CV), a variabilidade foi classificada, segundo Warrick & Nielsen (1998), em baixa ( $CV \leq 12\%$ ); média ( $12 < CV \leq 60\%$ ) e alta variabilidade ( $CV > 60\%$ ).

Os valores discrepantes foram filtrados segundo o critério de Hoaglin et al. (1992), que consideram discrepantes aqueles dados abaixo do limite inferior (Li) ou acima do limite superior (Ls), respectivamente, estimados pelas equações abaixo:

$$Li = Qi - 1,5AP \quad (4)$$

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

onde: Li = limite inferior; Ls = limite superior; Qi = quartil inferior; Qs = quartil superior; AP = amplitude entre o 1<sup>a</sup> e o 3<sup>a</sup> quartil.

Para a análise geoestatística, utilizou-se a ferramenta geoestatística GEOEAS. A dependência espacial da salinidade e da sodicidade foi analisada através do semivariograma clássico construído a partir da estimativa das semivariâncias, dada pela Equação 6 (Journel, 1989).

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^n [Z(X_i + h) - Z(X_i)]^2 \quad (6)$$

em que,  $\hat{\gamma}(h)$  = valor estimado da semivariância dos dados experimentais;  $Z(x_i + h)$  e  $Z(x_i)$  = valores observados da variável regionalizada; e  $N(h)$  = número de pares de valores medidos, separados por uma distância  $h$ .

De posse do semivariograma experimental procedeu-se ao ajuste dos dados a um modelo teórico e se testaram os modelos exponencial, gaussiano e esférico. O ajuste matemático possibilitou definir os seguintes parâmetros: efeito pepita ( $C_0$ ), alcance da dependência espacial ( $A$ ) e patamar ( $C_0+C_1$ ). São apresentados, a seguir, os três modelos teóricos considerados (Equações 7, 8, 9 e 10):

- Modelo Exponencial:

$$\hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1 \left[ 1 - e^{-\left(\frac{h}{A}\right)} \right] \quad h \neq 0 \quad (7)$$

- Modelo Gaussiano:

$$\hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1 \left[ 1 - e^{-\left(\frac{h^2}{A^2}\right)} \right] \quad h \neq 0 \quad (8)$$

- Modelo Esferico:

$$\hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1 \left[ 1,5 \frac{h}{A} - 0,5 \left(\frac{h}{A}\right)^3 \right] \quad 0 < h < A \quad (9)$$

$$\hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1 \quad h > A \quad (10)$$

Foi escolhido o modelo que apresentou melhor ajuste aos valores experimentais, segundo a técnica de Jack-Knifing (VAUCLIN et al., 1983), em que cada um dos valores medidos é interpolado pelo método da krigagem, e os valores medidos então são substituídos pelos estimados e calculada, em seguida, a distribuição dos erros padronizados, a qual deve apresentar média próximo a zero e desvio-padrão unitário (MONTENEGRO; MONTENEGRO, 2006).

O índice de dependência espacial (IDE) foi calculado de acordo com Cambardella et al. (1994), como a razão entre o efeito pepita e o patamar dos semivariogramas teóricos. Este critério estabelece uma forte dependência quando uma determinada razão é inferior a 25%, moderada para uma razão entre 25 e 75%, e fraca quando a razão é superior a 75%.

Após a validação do semivariograma, foi realizada a krigagem universal dos dados e para confeccionar os mapas de distribuição espacial, utilizando-se o software *Surfer for Windows* versão 8.0 (SURFER, 2002).

### **3 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

#### **3.1 Análise climática**

As séries temporais de precipitação e evapotranspiração mensal e valores correspondentes ao ano de 2019 são apresentados na Tabela 2.

Os valores médios de precipitação foram superiores à média para os meses de março, julho e dezembro, e ficaram abaixo da média em todos os outros meses. Os valores de evapotranspiração apresentaram-se próximos as médias históricas, com maior variação nos meses de maio a agosto, em função da precipitação e da diminuição da temperatura do ar. As explorações médias acompanharam inversamente a dinâmica de disponibilidade de água proveniente da precipitação, apresentando elevados valores médios de outubro a dezembro, com máxima em 2019 para o mês de outubro, que apresenta, historicamente, baixo índice pluviométrico na região. Observa-se que após o período chuvoso de junho e julho, o mês de agosto já apresenta vazão de exploração significativa, em detrimento de um baixo índice pluviométrico.

Tabela 2 - Médias mensais históricas e para o ano de 2019 dos dados meteorológicos, vazão média de exploração de água e medidas estatísticas para a condutividade elétrica (CE).

Mês/Ano	P	P*	Et <sub>0</sub>	Et <sub>0</sub> *	Q med	CE (dS m <sup>-1</sup> )			
	mm				m <sup>3</sup> dia <sup>-1</sup>	Média	Máx	Mín	CV(%)
Jan-19	42,5	71,0	204,1	195,1	522,1	2,50	25,79	0,61	203
Fev-19	45,1	65,7	178,9	189,3	498,3	3,59	31,56	0,66	204
Mar-19	150,9	102,8	190,3	196,0	489,4	2,28	24,72	0,43	222
Abr-19	23,2	63,1	161,7	157,0	465,9	2,43	23,73	0,36	220
Mai-19	29,3	64,2	145,7	131,1	434,5	2,18	22,73	0,35	221
Jun-19	52,7	84,5	120,5	116,0	289,0	1,72	19,37	0,25	218
Jul-19	167	65,9	114,9	119,7	121,0	2,00	21,07	0,26	228
Ago-19	7,8	44,2	159,2	156,3	461,0	1,39	19,99	0,34	2.46
Set-19	31	16,3	144,6	183,8	568,5	1,58	15,56	0,39	1.94
Out-19	4,3	15,2	222,2	214,8	740,7	1,73	17,74	0,35	1.99
Nov-19	7,0	6,4	230,4	226,1	699,7	1,77	20,90	0,51	2.16
Dez-19	88	30,2	201,2	224,9	530,2	2,23	21,76	0,50	2.24

P= precipitação mensal acumulada; P\* = média histórica da precipitação mensal; ET<sub>0</sub>= evapotranspiração de referência mensal acumulada; ET<sub>0</sub>\*= média histórica da evapotranspiração mensal; Q= exploração média diária por mês e CE= condutividade elétrica.

Os valores de condutividade elétrica (CE) variaram entre 0,35 e 25,79 dS m<sup>-1</sup>, com desvio padrão variando 3,04 a 7,3, o que reflete a alta dispersão dos valores com relação à média. A observação é confirmada pelos altos valores dos coeficientes de variação. Tais resultados também foram encontrados por Andrade et al. (2012), avaliando o vale aluvial do Mimoso, onde os autores alertaram para a presença de extremos nos conjuntos de dados ao longo de três anos consecutivos.

Segundo o critério estabelecido por Hoaglin et al. (1992), procedeu-se à filtragem de dados extremos, considerando-se o conjunto completo de dados, que podem ter sido influenciados pela presença de valores muito acima ou muito abaixo da maioria observada. Ao total, 9 piezômetros apresentaram valores extremos de CE ao longo do ano, e três apresentaram valores extremos em todos os meses monitorados. Os piezômetros retirados da avaliação inicial localizavam-se na porção central do vale, que foi apontada por Montenegro et al. (2001) como uma região de maior acúmulo de sais, devido à confluência entre dois

riachos, Ipaneminha e Mimoso. A área apresenta alta concentração de sais, tanto no solo quanto na água subterrânea (ANDRADE et al., 2012).

Na Figura 1 observa-se o *box-plot* da distribuição temporal dos dados de condutividade elétrica após a retirada dos valores extremos.

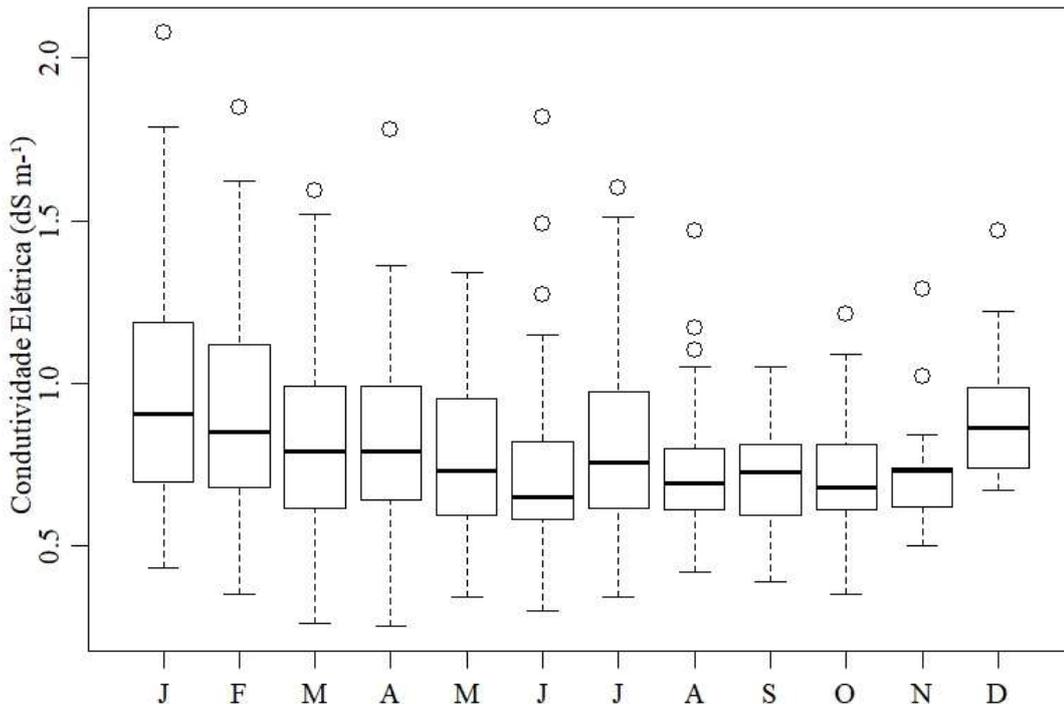


Figura 1 -. Box-plot da condutividade elétrica para todos os meses de 2019, após a filtragem dos valores extremos, no Vale aluvial do Mimoso, Pesqueira-PE

Os dados filtrados foram adotados para a estimativa do semivariograma médio da área em estudo. Entretanto, para a krigagem, os dados discrepantes foram considerados, uma vez que, embora sejam divergentes da média, representam a realidade, mantendo-se assim, o mapeamento o mais fiel possível às condições de campo. Os coeficientes de variação da condutividade elétrica, após a retirada dos extremos, variaram entre 30% e 40%, podendo ser classificados como de média variação. O procedimento foi suficiente, também, para normalizar os dados, sendo verificada a aderência dos dados pelo teste de Kolmogorov-Smirnov a 5%, com  $D_n(\text{máx})$  de 0,13; 0,08; 0,13; 0,08; 0,21; 0,15; 0,18; 0,14; 0,21; 0,08; 0,15; 0,21 e p-valor de 0,48; 0,96; 0,65; 0,99; 0,13; 0,20; 0,19; 0,41; 0,40; 0,12; 0,17; 0,22 para os meses de janeiro a dezembro, respectivamente.

### 3.2 Avaliação dos cátions solúveis

A Tabela 3 fornece estatísticas descritivas para os principais cátions avaliados ao longo dos meses e para a razão de adsorção de sódio. Com base nos valores médios, a ordem dos cátions principais é:  $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$ . Todos os cátions apresentaram amplas faixas de variação, para todos os meses avaliados, com destaque para o  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ , com alta variabilidade. As concentrações de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$  representam em média 38,4%, 38,3%, 13,8% e 9,4%, respectivamente.

Segundo Pazand et al. (2018), a relação  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$  é um importante indicador hidrogeoquímico no tocante à composição química da água, pois representa a dissolução de minerais de silicato na água. No presente estudo, essa relação foi de aproximadamente 1, indicando que está ocorrendo a dissolução da dolomita, presente da construção rochosa do cristalino (Kim et al., 2002). Outro aspecto importante da relação  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$  é o índice de dureza da água. Os valores médios da dureza total nas amostras de água foram de 113; 94,4; 87,2; 109; 124,9 e 109,4 para os meses de maio, junho, julho, agosto, outubro e novembro, respectivamente. Para todos os meses, a água subterrânea foi considerada muito dura. Segundo Lima et al. (2020), as principais reações responsáveis pelo enriquecimento das águas subterrâneas com magnésio e cálcio são as trocas  $\text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+}$  devido à interação água e aos carbonatos presentes na rocha, além das trocas iônicas entre  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{Na}^+$ .

Tabela 3 - Estatística descritiva mensal dos parâmetros químicos da água subterrânea no vale aluvial do Mimoso

	Mai-19	Jun-19	Jul-19	Ago-19	Set-19	Out-19	Nov-19
<b>A. Sódio (mg L<sup>-1</sup>)</b>							
Média	125,0	114,4	91,5	93,3	118,5	126,5	118,2
Máximo	595,2	609,7	609,7	541,8	554,5	555,4	577,5
Mínimo	44,3	11,0	8,3	46,9	61,2	60,3	53,7
Desvio Padrão	133,8	114,2	108,1	90,1	103,9	117,2	104,4
CV	1,07	1,00	1,18	0,97	0,88	0,93	0,88
<b>B. Potássio (mg L<sup>-1</sup>)</b>							
Média	68,7	79,0	75,9	74,3	85,5	74,6	74,8
Máximo	95,1	110,3	110,3	108,9	113,5	95,1	108,9
Mínimo	15,6	1,1	15,6	30,0	37,4	41,6	33,7
Desvio Padrão	20,2	25,0	23,2	19,7	20,5	15,7	21,9
CV	0,29	0,32	0,31	0,27	0,24	0,21	0,29
<b>C. Cálcio (mg L<sup>-1</sup>)</b>							
Média	332,9	262,2	242,9	347,4	338,3	374,4	278,6
Máximo	2905,8	1282,6	721,4	1082,2	1683,4	1683,4	1603,2
Mínimo	80,2	48,1	60,1	100,2	120,2	80,2	56,1
Desvio Padrão	459,6	223,2	160,8	218,9	305,0	388,2	308,7
CV	1.38	0.85	0.66	0.63	0.90	1.04	1.11
<b>D. Magnésio (mg L<sup>-1</sup>)</b>							
Média	294,4	284,7	260,8	217,6	410,2	309,6	394,3
Máximo	1507,2	1653,1	1337,1	875,2	2042,0	1416,1	2066,4
Mínimo	12,2	24,3	24,3	24,3	24,3	36,5	24,3
Desvio Padrão	347,0	276,6	252,6	188,0	509,0	279,9	415,9
CV	1.18	0.97	0.97	0.86	1.24	0.90	1.05
<b>E. Razão de Adsorção de Sódio (mmol L<sup>-1</sup>)<sup>0,5</sup></b>							
Média	6,7	6,7	5,8	5,3	7,0	7,0	6,5
Máximo	19,4	22,5	35,1	18,9	30,5	22,0	15,4
Mínimo	3,0	0,8	0,4	3,3	2,5	2,7	2,9
Desvio Padrão	3,6	3,6	6,0	2,8	6,0	4,7	2,7
CV	0.54	0.54	1.03	0.53	0.86	0.67	0.42

As concentrações de Na<sup>+</sup> e K<sup>+</sup> variaram de 8,3 a 609,7 mg L<sup>-1</sup> e de 1,10 a 113,5 mg L<sup>-1</sup>, respectivamente, apresentando alta e média variabilidade. Os teores de K foram baixos o que, segundo Nouayti et al. (2015), é comum as águas subterrâneas, tendo sua concentração elevada em locais onde são utilizados fertilizantes na forma de sulfato de potássio, cloreto de potássio ou nitrato de potássio, nas atividades agrícolas.

A relação entre o teor de  $\text{Na}^+$  e os outros cátions expressados pelo percentual de sódio (PS) foram, em média, de 17,9%, 18,2%, 15,7%, 14,6%, 14,2%, 16,7% e 15,8% para os meses de maio, junho, julho, agosto, outubro e novembro, respectivamente. Os resultados não expressam problemas quanto presença de sódio, entretanto, três pontos da rede de monitoramento apresentaram percentual elevado, variando de 60 a 72%, ao longo dos meses avaliados. Resultados semelhantes foram encontrados por Jamaa et al. (2020), avaliando a variação espacial da qualidade das águas na planície de Doukkala, Marrocos, onde os autores alertaram que a irrigação com água com uma carga de sódio superior a 60% pode levar ao acúmulo de sódio no solo e, portanto, destruir a estrutura do solo.

A taxa de adsorção de sódio (RAS), que indica o efeito da concentração relativa do íon  $\text{Na}^+$  em relação aos cátions  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ , variou de 0,8 a 35,1 ( $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ )<sup>0,5</sup> sendo classificada como moderada a forte. Observou-se também a presença de valores extremos, segundo o critério de Hoaglin et al. (1992).

Segundo Boufekane e Saighi (2019), os valores de correlação entre íons podem ser usados para determinar a origem dos íons nas águas subterrâneas, onde o aumento ou a diminuição dos íons nas águas subterrâneas é usado como indicativo de dissolução de minerais. Na Tabela 4 está apresenta a correlação de Spearman entre os teores de sais, a condutividade elétrica (CE) e a razão de adsorção de sódio (RAS) para os meses de maio a novembro de 2019.

Tabela 4 - Correlação de Spearman entre os teores de sais, condutividade elétrica (CE) e razão de adsorção de sódio (RAS) para os meses de maio a novembro de 2019

A. Maio							
	CE	Na	K	Ca	Mg	RAS	P
CE	1,00						
Na	-0,10	1,00					
K	-0,48	0,38	1,00				
Ca	-0,07	0,65	0,31	1,00			
Mg	-0,01	0,93	0,42	0,46	1,00		
RAS	0,67	-0,15	-0,43	-0,04	-0,07	1,00	
P	-0,06	0,31	-0,09	0,15	0,21	-0,04	1,00

B. Junho							
	CE	Na	K	Ca	Mg	RAS	P
CE	1,00						
Na	0,44	1,00					
K	-0,25	-0,22	1,00				
Ca	0,49	0,58	0,08	1,00			
Mg	0,58	0,84	-0,12	0,58	1,00		
RAS	0,72	0,17	-0,24	0,10	0,25	1,00	
P	-0,11	0,05	0,12	0,01	0,10	-0,03	1,00

C. Julho							
	CE	Na	K	Ca	Mg	RAS	P
CE	1,00						
Na	-0,06	1,00					
K	-0,16	0,32	1,00				
Ca	-0,07	0,39	0,29	1,00			
Mg	-0,05	0,77	0,32	-0,11	1,00		
RAS	0,91	-0,11	-0,14	-0,04	-0,14	1,00	
P	0,20	-0,10	-0,34	0,07	-0,20	0,15	1,00

D. Agosto							
	CE	Na	K	Ca	Mg	RAS	P
CE	1,00						
Na	-0,15	1,00					
K	-0,17	-0,12	1,00				
Ca	0,46	0,11	-0,21	1,00			
Mg	-0,20	0,18	-0,10	-0,15	1,00		
RAS	-0,03	-0,12	0,26	-0,21	0,20	1,00	
P	0,02	-0,21	-0,12	0,11	0,24	-0,04	1,00

E. Setembro							
	CE	Na	K	Ca	Mg	RAS	P
CE	1,00						
Na	-0,13	1,00					
K	-0,22	0,38	1,00				
Ca	-0,16	0,25	0,30	1,00			
Mg	-0,14	-0,19	-0,44	-0,09	1,00		
RAS	0,93	0,02	-0,09	-0,15	-0,21	1,00	
P	-0,05	-0,09	0,05	-0,16	-0,07	-0,04	1,00

F. Outubro							
	CE	Na	K	Ca	Mg	RAS	P
CE	1,00						
Na	-0,19	1,00					
K	0,13	-0,16	1,00				
Ca	0,07	0,44	-0,06	1,00			
Mg	-0,13	0,19	-0,12	-0,17	1,00		
RAS	0,68	-0,24	0,18	-0,16	0,02	1,00	
P	-0,08	-0,10	0,17	-0,12	0,04	-0,11	1,00

G. Novembro							
	CE	Na	K	Ca	Mg	RAS	P
CE	1,00						
Na	-0,14	1,00					
K	-0,02	0,25	1,00				
Ca	0,02	0,90	0,45	1,00			
Mg	-0,20	0,50	0,06	0,42	1,00		
RAS	0,83	-0,17	0,18	-0,03	-0,27	1,00	
P	-0,08	0,80	0,34	0,82	0,43	-0,09	1,00

A matriz de correlação demonstrou correlações positivas e estatisticamente significativas entre a RAS e a CE, e relações positivas entre a maioria dos cátions analisados ao longo dos meses, com exceção para o mês de agosto, onde a correlação RAS – CE foi negativa e não significativa. Este resultado indica relação inversa entre o comportamento da

RAS e CE para o mês de agosto, sendo o mês que apresenta temporalmente o maior risco de redução de infiltração em detrimento na baixa condutividade e sodicidade e elevada dureza.

### 3.3 Análise geoestatística

Os semivariogramas escalonados pela variância, para os meses de janeiro a dezembro de 2019, são apresentados na Figura 2. Os semivariogramas foram validados de acordo com o critério de Jack-Knifing, com o desvio padrão próximo a um (0,93; 1,1; 0,97; 0,92; 1,2; 0,98; 1,01; 1,09; 1,03; -0,86; 1,08; -0,95 ), bem como, os erros médios próximos a zero (0,04; 0,14; -0,02; -0,01; 0,05; -0,01; -0,02; -0,05; -0,04; -0,06; -0,01; 0,05), de janeiro a dezembro de 2019, respectivamente.

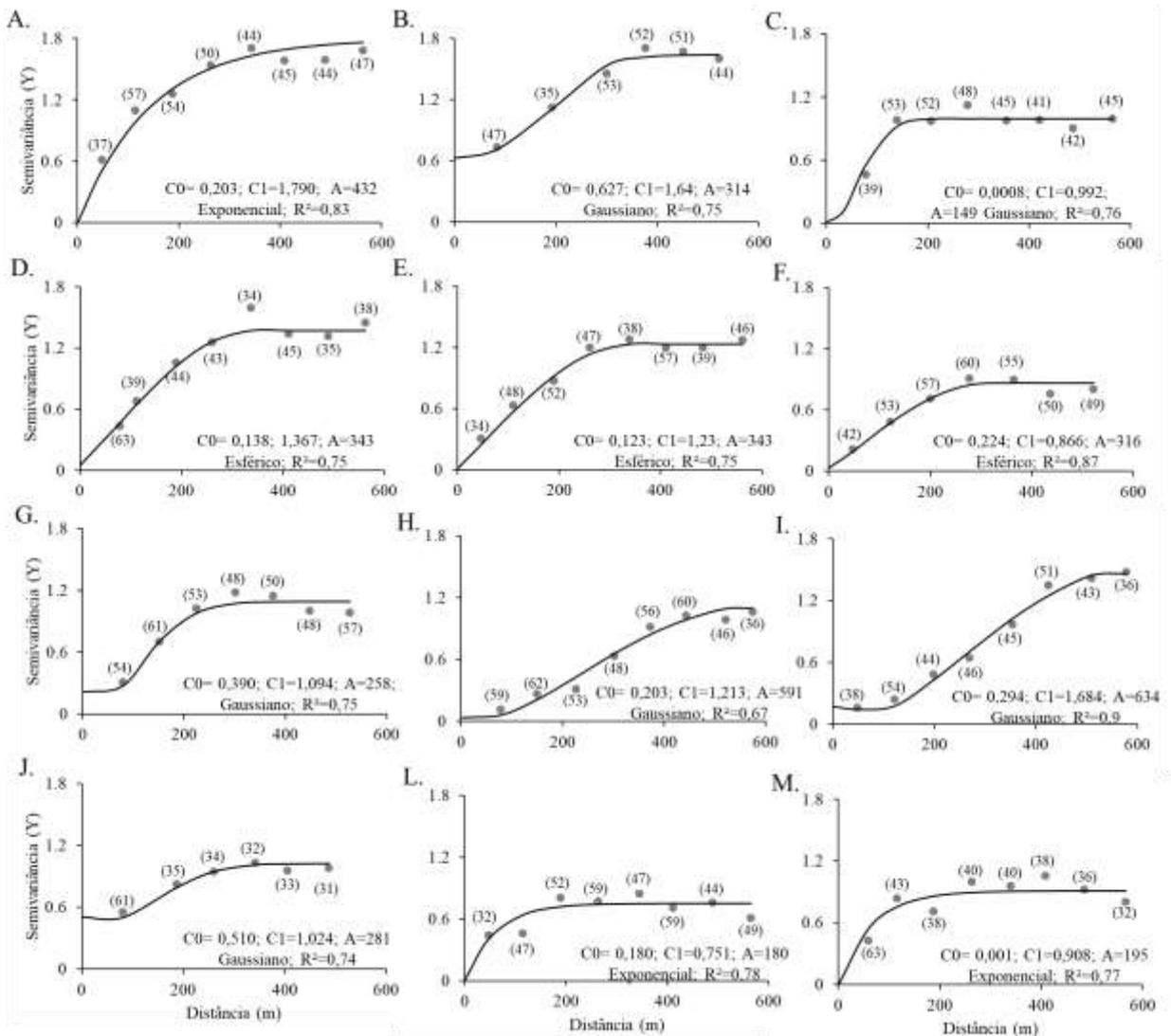


Figura 2 - Semivariogramas escalonados pelas variâncias da CE e ajustes dos modelos exponencial, gaussiano e esférico, para os meses de janeiro (A) a dezembro (M) de 2019. C0 representa o efeito pepita, C0 + C1 o patamar e A o alcance do modelo.

A condutividade elétrica apresenta uma estrutura de dependência espacial na área estudada com alcances que variaram de 180 a 634 m. A dependência espacial pode ser considerada forte, para os meses de janeiro, março, abril, maio, setembro, novembro e dezembro. Para os meses de fevereiro, junho, julho, agosto e outubro, a dependência foi considerada moderada. Souza et al. (2006), trabalhando no vale aluvial do Mimoso, obtiveram resultados semelhantes, com dependência espacial variando de moderada a forte nos períodos úmido e seco, respectivamente. De acordo com os autores, as precipitações e outras fontes de recarga no aluvião fortalecem a dependência espacial, tendo em vista que uniformizam a concentração de sais dentro do aquífero. Ao longo do período seco, essa dependência tende a diminuir, em consequência dos diferentes manejos e volumes extraídos de água para fins agrícolas. No presente estudo, não se observou um padrão de dependência em função dos períodos seco e úmido, com coeficientes de correlação não significativos (Tabela 2) para a precipitação e CE, o que pode ser explicado pelos volumes de água explorados para atividades agrícolas na região, as quais interferem no sistema de recarga e consequentemente, na dinâmica de diluição de sais ao longo do aquífero.

No tocante a RAS, foram ajustados os modelos gaussiano, esférico e exponencial, apresentados na Figura 3. Os semivariogramas foram validados pelos critérios de Jack-Knifing, com o desvio padrão próximo a um (1,02; 1,14; 1,09; 1,11; 1,04; 1,02; 1,3) e erros médios próximos a zero (-0,002; -0,003; 0,01; -0,003; -0,03; 0,128; 0,02), com alcances que variaram de 107 a 744 m, e dependência espacial forte ao longo dos meses, com exceção para o mês de outubro, que apresentou dependência moderada. Também não foi possível associar as mudanças de modelo a um padrão de variação.

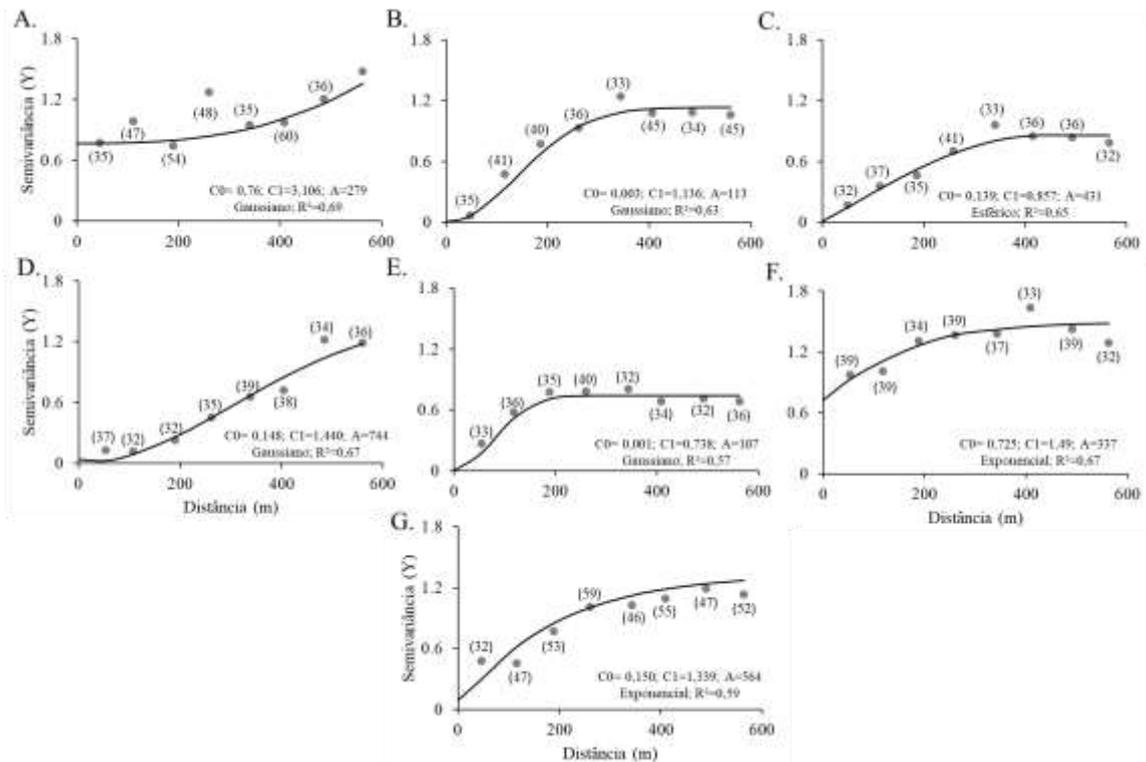


Figura 3 - Semivariogramas escalonados pelas variâncias da RAS e ajustes dos modelos exponencial, gaussiano e esférico, para os meses de maio a novembro de 2019. C0 representa o efeito pepita, C0 + C1 o patamar e A o alcance do modelo.

Os parâmetros de qualidade de águas subterrâneas escolhidos no presente estudo foram analisados de forma integrada, conforme sugerido por Slama e Sebei (2020). Na Figura 4 observa-se os semivariogramas cruzados para a razão de adsorção de sódio e a condutividade elétrica para os meses de maio a novembro de 2019, a fim de avaliar a correionalização entre elas.

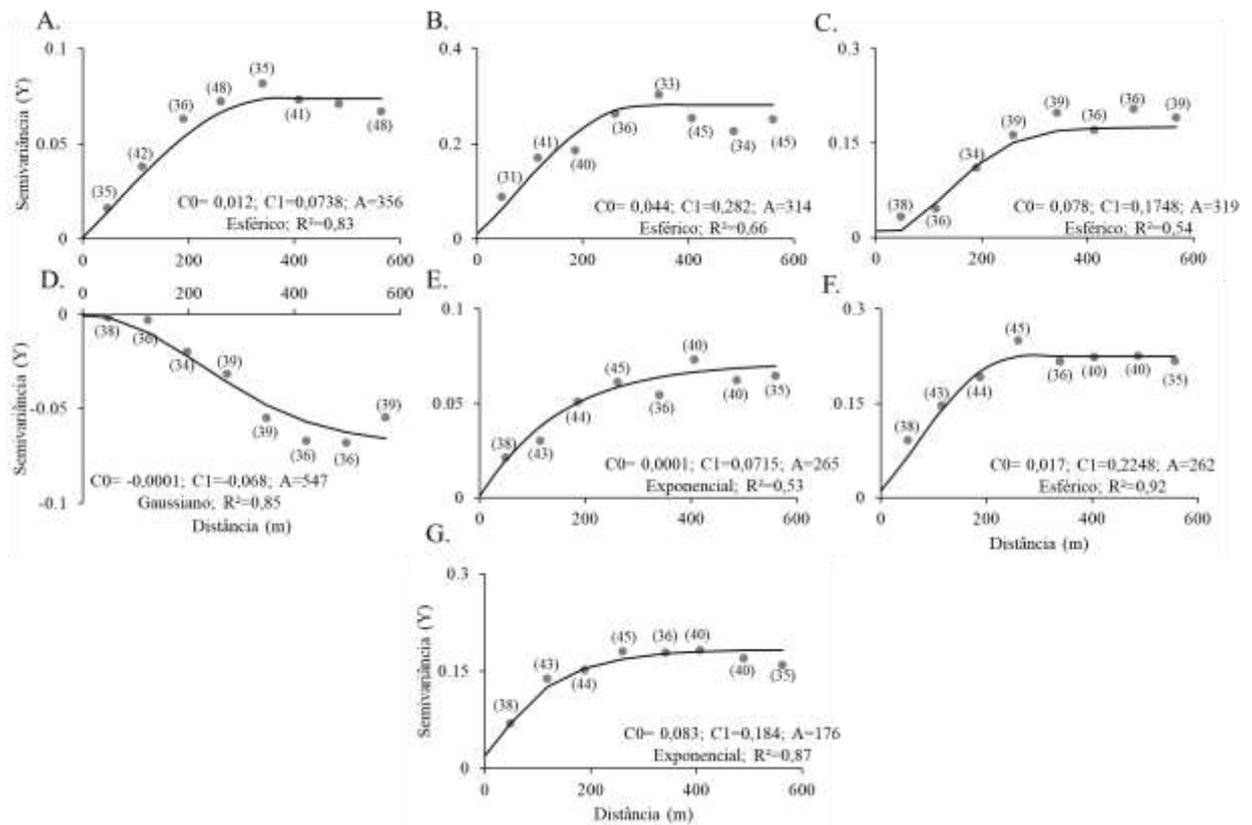


Figura 4 - Semivariogramas cruzados RAS X CE e ajustes dos modelos exponencial, gaussiano e esférico, para os meses de maio a novembro de 2019. C0 representa o efeito pepita, C0 + C1 o patamar e A o alcance do modelo.

Foram ajustados os modelos esféricos, gaussiano e exponenciais e validados de acordo com o critério de Jack-Knifing, com o desvio padrão próximo a um (0,97; 1,01; 0,89;0,99; 1,04; 0,95; 1,11), bem como, os erros médios próximos a zero (-0,06; 0,1; -0,02; -0,02; 0,02; -0,01; -0,02). Os semivariogramas cruzados indicaram forte correlação entre as variáveis e coeficientes de determinação ( $R^2$ ) maiores que 50%. Os alcances variaram entre 176 e 365 m, com dependência espacial entre moderada a forte. Para o mês de agosto, observou-se uma correlação negativa, isto é, os efeitos do aumento da razão de adsorção de sódio cresceram à medida que a salinidade da água diminuiu. Resultado semelhante foi encontrado por Tomaz et al. (2020), avaliando a variabilidade espaço temporal da qualidade da água de irrigação e os efeitos do seu uso no solo, no sul de Portugal.

Os modelos ajustados foram utilizados na confecção de mapas de isolinhas da condutividade elétrica (Figura 5) e da razão de adsorção de sódio (Figura 6), utilizando a técnica de krigagem. De acordo com a classificação de Richards (1954), para os meses de

janeiro a dezembro, 21,7%, 14,3%, 31,6%, 32,4%, 31%, 45,4%, 36,1%, 46,9%, 37%, 52,1%, 39,6% e 17,6% das amostras de águas subterrâneas são classificadas como leve, respectivamente; 67,4%, 67,9%, 57,9%, 59,5%, 59,5%, 47,7%, 55,6%, 50%, 54,3%, 37,5%, 52,1% e 73,5% como moderada, respectivamente; e 10,9%, 17,9%, 10,5%, 8,1%, 9,5%, 6,8%, 8,3%, 3,1%, 8,7%, 10,4%, 8,3% e 8,9% com alto teor salinidade, respectivamente.

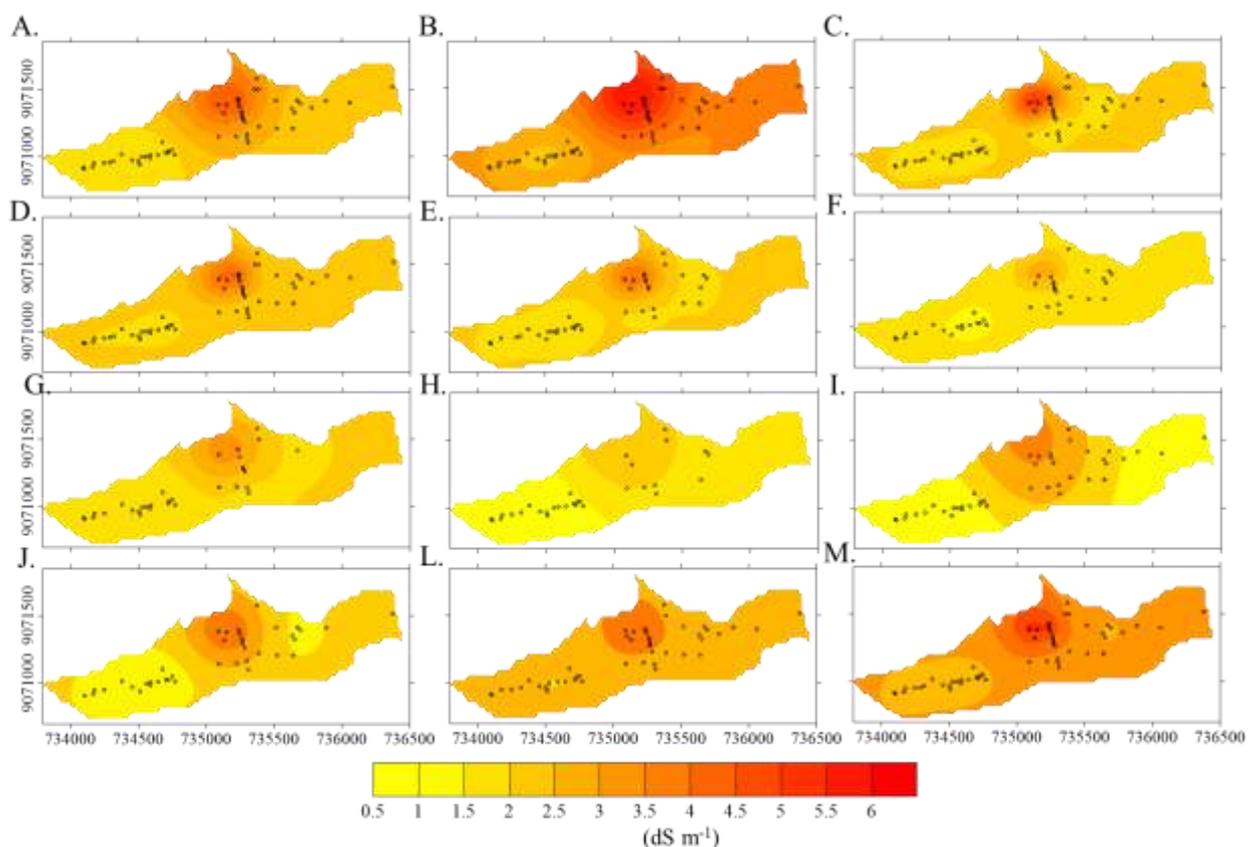


Figura 5 - Mapas de krigagem da CE para os meses de janeiro (A), fevereiro (B), março (C), abril (D), maio (E), junho (F), julho (G), agosto (H), setembro (I), outubro (J), novembro (L) e dezembro (M) de 2019.

Verificou-se que as regiões de maior CE estão situadas na parte central do vale, onde segundo Andrade et al. (2012), a textura do solo é mais fina e a camada de impedimento se encontra mais próxima à superfície do solo. Estudos anteriores de Montenegro et al. (2001) e Montenegro e Montenegro (2006) indicaram que esta região central é influenciada pelo fluxo subterrâneo regional e por contribuições de escoamento das encostas do vale que alimentam o freático, o que também propicia o aumento da salinidade, já que carrega parte dos sais presentes no solo das encostas para esta região.

Observou-se que as condutividades elétricas que apresentaram valores inferiores a  $4 \text{ dS m}^{-1}$ , sofreram maior influência da precipitação na variação espacial. As áreas que apresentaram águas subterrâneas com condutividade elétrica acima deste valor, tenderam a não sofrer variações, mantendo concentrações elevadas ao longo do tempo. Nota-se que o mês de fevereiro (Figura 5B) apresentou maiores valores de CE na região oeste, em detrimento a lixiviação de sais do perfil solo para o aquífero. Já o mês de agosto apresentou a menor concentração de sais na água em função dos eventos pluviométricos acumulados ao longo dos meses. Em setembro, observa-se uma nova dinâmica de concentração de sais na água, em função de uma maior evapotranspiração e das constantes extrações de água, que se elevam nesse período.

A dinâmica espaço-temporal da razão de adsorção de sódio é mostrada nos mapas de krigagem da Figura 6.

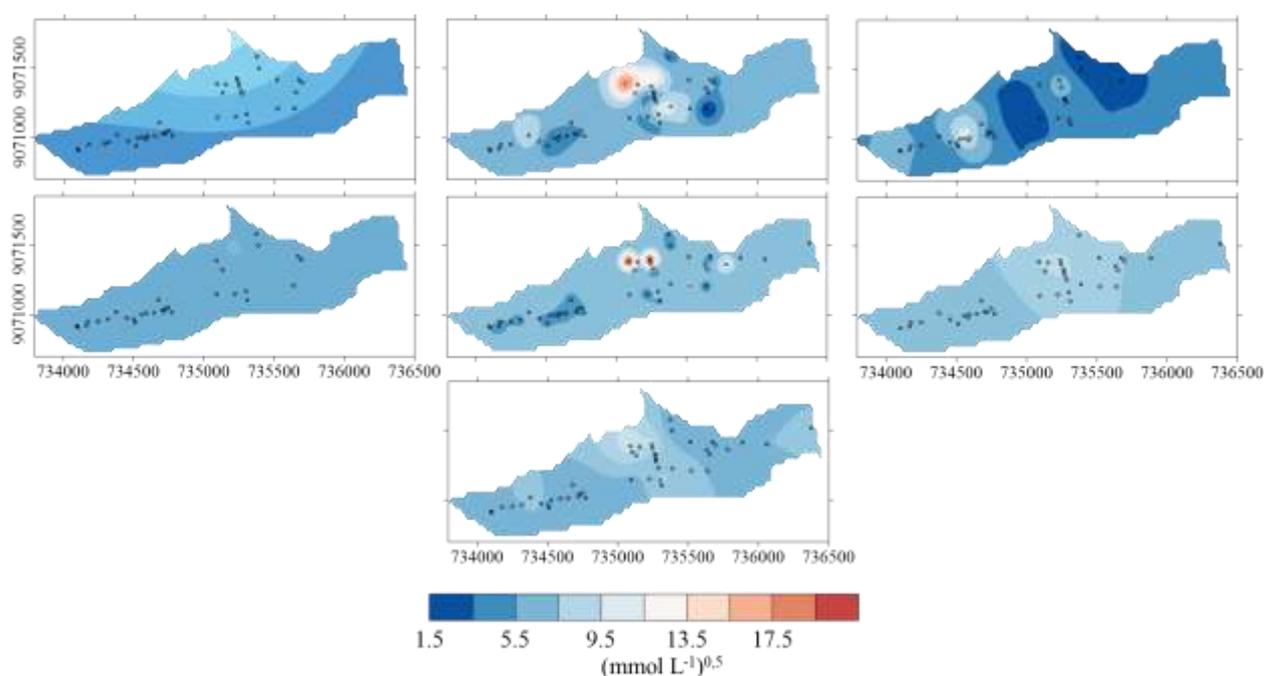


Figura 6 - Mapas de krigagem Razão de Adsorção de Sódio (RAS) para os meses de maio (A), junho (B), julho (C), agosto (D), setembro (E), outubro (F) e novembro (G) de 2019.

De acordo com o resultado da distribuição espacial, os maiores valores da razão de adsorção de sódio (RAS) representaram risco moderado, segundo a classificação de Richard (1954) e apresentam, em sua maioria, dinâmica espaço-temporal semelhante aos da condutividade elétrica, sendo diretamente proporcional. Entretanto, destaca-se a presença de

teores elevados de sódio para os meses de junho, julho e novembro, na porção oeste do vale. Considerando que nesta região há a presença de lotes agrícolas, Boufekane e Saighi (2019) sugerem que tais resultados estejam associados às atividades agrícolas, que envolvem o manejo de pesticidas e fertilizantes.

Resultados semelhantes aos da dinâmica espacial da CE e RAS foram encontrados por Delbari et al. (2016), em que os autores identificaram locais onde a salinidade e a sodicidade das águas danifica lavouras e solos, e reduz o rendimento agrícola da região. Entretanto, os autores destacaram que culturas mais toleráveis a salinidade poderiam ser cultivadas, com uma boa instalação de sistema de drenagem para evitar a salinização do solo e perda de produção agrícola.

Os semivariogramas dos indicadores de adequação da água subterrânea, segundo o diagrama de classificação de Richard (1957), para os meses de maio a novembro de 2019, são apresentados na Figura 7.

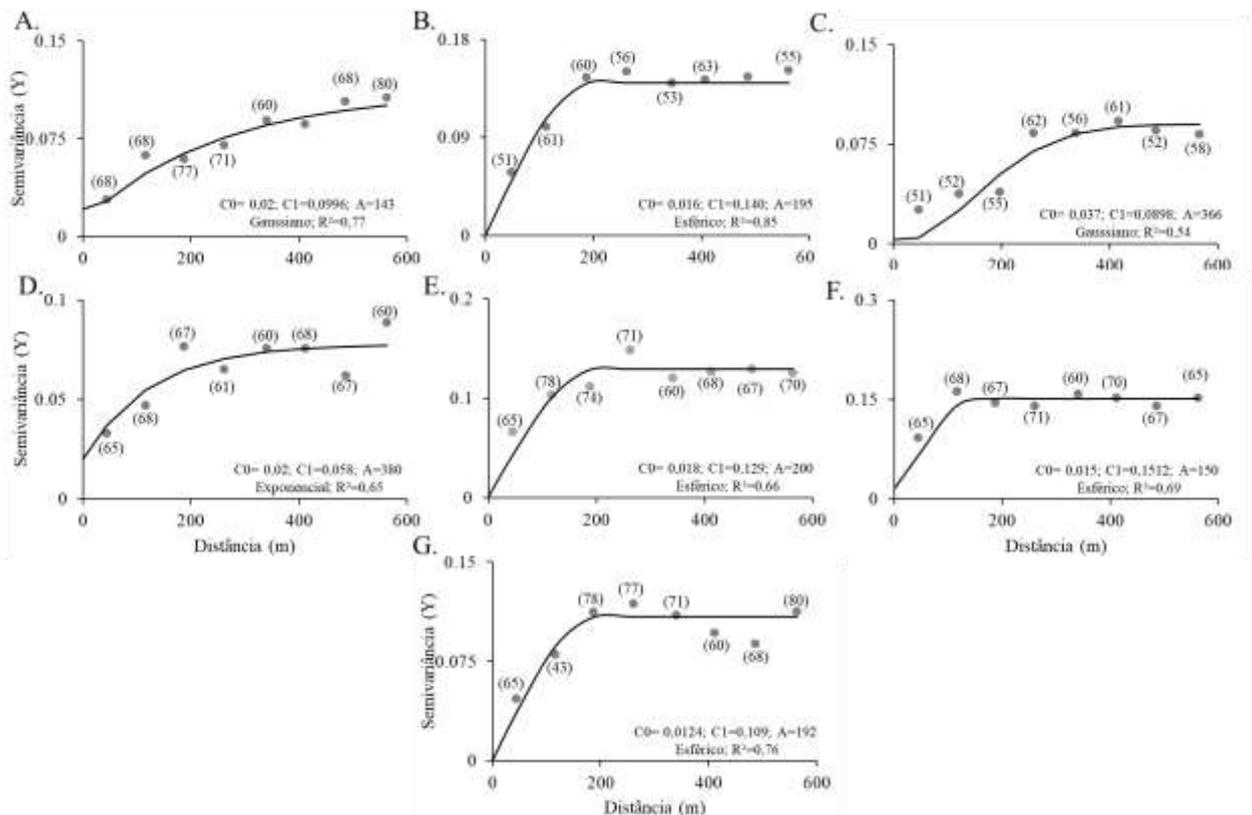


Figura 7 - Semivariogramas dos indicadores de adequação da água subterrânea e ajustes dos modelos exponencial, gaussiano e esférico, para os meses de maio (A); junho (B); julho (C); agosto (D); setembro (E); outubro (F); novembro (G) de 2019.

O indicador de qualidade da água apresenta uma estrutura de dependência espacial na área estudada com alcances que variaram de 143 a 366 m. A relação entre o efeito pepita e o patamar dos semivariogramas variou de 10 a 41,2%; portanto, a dependência espacial pode ser considerada de forte a moderada, ao longo dos meses, com comportamento muito semelhante ao da CE.

Os modelos ajustados foram utilizados na confecção de mapas de isolinhas da qualidade da água subterrânea para fins de irrigação (Figura 8). Neste mapa, as áreas adequadas e inadequadas para irrigação foram definidas como azul e vermelho, respectivamente.

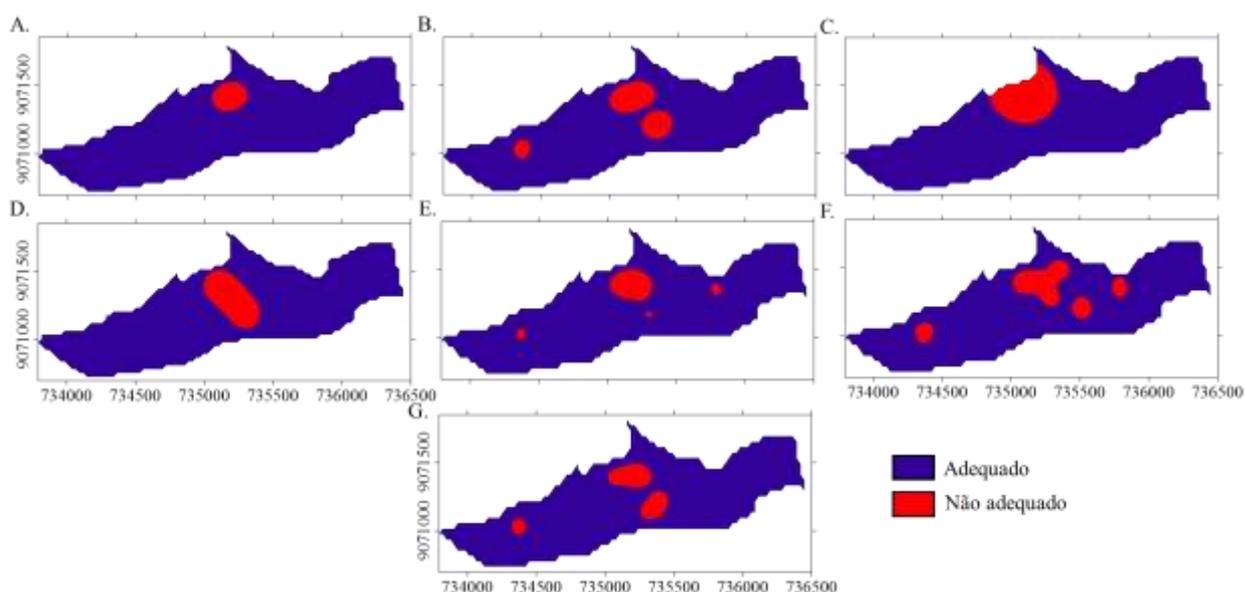


Figura 8 - Mapas de krigagem da qualidade da água subterrânea para fins de irrigação para os meses de maio (A); junho (B); julho (C); agosto (D); setembro (E); outubro (F); novembro (G) de 2019

De acordo com os mapas, as áreas mais adequadas para a irrigação, em termos de qualidade, estão localizadas nas partes oeste e leste da área de estudo, com algumas exceções em pontos onde a agricultura e as explorações são realizadas de forma mais intensa. As áreas inadequadas para irrigação variaram de 6,3 a 20,5% da área total, enquanto que as áreas adequadas para irrigação representaram de 81,4 a 93,7%, ao longo dos meses avaliados.

## 4 CONCLUSÃO

1. A análise de cátions permitiu identificar o processo natural de dissolução de sais, proveniente do cristalino, em contato com a água armazenada no aquífero.
2. A análise da DT e PS, confirmou que mais de 80% das amostras de água subterrânea são adequadas para fins de irrigação ao longo dos meses.
3. O risco de salinidade foi considerado moderado a alto na porção central do vale, sendo necessária uma gestão especial para o controle da salinidade, uma vez que nesses locais as águas subterrâneas não podem ser usadas com segurança para a irrigação.
4. O risco de sodicidade foi considerado moderado, com áreas de maior risco localizadas na porção central do vale, em concomitância com as áreas de alto risco de salinidade.
5. Este estudo pode ser útil no processo de tomada de decisão, relacionado à determinação de áreas apropriadas para a irrigação na região.

## REFERÊNCIAS

- Adimalla, N. Groundwater Quality for Drinking and Irrigation Purposes and Potential Health Risks Assessment: A Case Study from Semi-Arid Region of South India. **Exposure and Health**, v.11, n.2, p.109–123, 2019.
- 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, p.496-504, 2012.
- Ayers, R. S.; Westcot, D. W. **A qualidade da água na agricultura**. Campina Grande: UFPB, 1999. 153p. Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 29.
- Bodrud-Doza, M.; Islam, A.R.M.; Ahmed, F.; Das, S.; Saha, N.; Rahman, M.S. Characterization of groundwater quality using water evaluation indices, multivariate statistics and geostatistics in central Bangladesh. **National Water Research Center**, n.30, p.19-40, 2016.
- Boufekane, A.; Saighi, O. Assessing groundwater quality for irrigation using geostatistical method- Case of wadi Nil Plain (North-East Algeria). **Groundwater for Sustainable Development**, v.8. p179-186, 2019.

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.

Corrêa, M. M; Ribeiro, M. R. Levantamento detalhado de solos da Fazenda Nossa Senhora do Rosário (Pesqueira-PE). Recife: UFRPE/UFPE/CNPq/BNB. 2001. 35p. Relatório Técnico

Delbari, M.; Amiri, M.; Motlagh, M.B. Assessing groundwater quality for irrigation using indicator kriging method. **Applied Water Science**, n.6, p.371-381, 2016.

Delbari, M.; Motlagh, M.B.; Kiani, M.; Amiri, M. Investigating spatio-temporal variability of groundwater quality parameters using geostatistics and GIS. **International Research Journal of Applied and Basic Sciences**, v.4, p.3623-3632, 2013.

Faraj, T.; Ragab, A.; El Alfy, M. Geochemical and hydrogeological factors influencing high levels of radium contamination in groundwater in arid regions. **Environmental Research**, n.184, p.1-12, 2020.

Fontes Júnior, R.V.P.; Montenegro, A.A.A. Temporal dependence of potentiometric levels and groundwater salinity in alluvial aquifer upon rainfall and evapotranspiration. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.22, n.54, 2017.

Hoaglin, D. C.; Mosteller, F.; Tukey, J. W. **Análise exploratória de dados: Técnicas robustas**. Lisboa: Edições Salamandra, 446p, 1992.

Ibrahim, N.I.M. The relations between concentration of iron and the pH ground water (case study Zulfi ground water). **International Journal of Environmental Monitoring**, n4, v.6, p. 140-145, 2016.

Ielpo, P., Leardi, R., Pappagallo, G., Uricchio, V.F., 2017. Tools based on multivariate statistical analysis for classification of soil and groundwater in Apulian agricultural sites. **Environmental Science and Pollution Research**, n.24, v.16, p.13967-13978.

Jamaa, H.; El Achheb, A.; Namr, K.I. Spatial variation of groundwater quality and assessment of water table fluctuations in Plio-Quaternary aquifer formations in Doukkala Plain, Morocco. **Groundwater for Sustainable Development**, v.11, p.1-11, 2020.

Journel, A. G. **Fundamentals of geostatistics in five lessons**. Washington: American Geophysical Union, 1989. 40p.

Kim, M.J., Nriagu, J., Haack, S. Arsenic species and chemistry in groundwater of southeast Michigan. **Environmental Pollution**, n.20, p.379–390, 2002.

Kumar, S.; Sanguetha, B. Assessment of ground water quality in Madurai city by using geospatial techniques. **Groundwater for Sustainable Development**, v.10, p.1-6, 2020.

Kumar, M.; Kumari, K.; Ramanathan, A.; Saxena, R. A comparative evaluation of groundwater suitability for irrigation and drinking purposes in two intensively cultivated districts of Punjab, India. **Journal of Environmental Geology**, n.53, p. 553-574, 2007.

Li, X.; Wu, H.; Qian, H.; Gao, Y. Groundwater Chemistry Regulated by Hydrochemical Processes and Geological Structures: A Case Study in Tongchuan, China. **Water**, v.10, p.1-16, 2018.

Lima, I. Q.; Ramos, O.R.; Muñoz, O.M.; M.; Aguirre, J. Q.; Duwig, C.; Maity, J.P.; Sracek, O.; Bhattacharya, P. **Science of the Total Environment**, v.719, p.1-14, 2020.

Mahmoud, M.I.; Gupta, H.V.; Rajagopal, S. Scenario development for water resources planning and watershed management: Methodology and semi-arid region case study. **Environmental Modelling & Software**, v.26, p.873-885, 2011.

Masoud, A.A.; El-Horiny, M.M.; Atwia, M.G.; Gemal, K.S.; Koike, K. Assessment of groundwater and soil quality degradation using multivariate and geostatistical analyses, Dakhla Oasis, Egypt. **Journal of African Earth Sciences**, n.142, p.64-81, 2018.

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, p.30-37, 2006.

Montenegro, S. M. G. L.; Montenegro, A. A. A.; Mackay, R.; Oliveira, A. S. C. de. Dinâmica hidro-salina em aquífero aluvial utilizado para agricultura irrigada familiar em região semiárida. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.8, p.85-92, 2003.

Montenegro, S. M. G. L.; Montenegro, A. A. A.; Mackay, R.; Oliveira, A. S. C. Dinâmica hidro-salina em aquífero aluvial utilizado para agricultura irrigada familiar em região semiárida. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.8, p.85-92, 2003.

Nouayti, N.; Khattach, D.; Hilali, M. Evaluation de la qualité physico-chimique des eaux souterraines des nappes du Jurassique du haut bassin de Ziz (Haut Atlas central, Maroc) Assessment of physico-chemical quality of groundwater of the Jurassic aquifers in high basin of Ziz (Central High Atlas, Morocco). **Journal of Materials and Environmental Science**, v.6, n. 4, p.1068-1071, 2015.

Patel, M.P.; Gami, B.; Patel, A.; Patel, P.; Patel, B. Climatic and anthropogenic impact on groundwater quality of agriculture dominated areas of southern and central Gujarat, India. **Groundwater for Sustainable Development**, n.10, p.1-11, 2020.

Pattnaik, S.; Reddy, M.V. Bioconversion of municipal (organic) solid waste into nutrient rich vermincompost by earthworms (*Eudrilus eugeniae*, *Eisenia fetida* and *Perionyx excavatus*) **Dynamic Soil, Dynamic Plant**, v.3, p. 122-128, 2009.

Pazand, K.; Khosravi, D.; Ghaderi, M.R.; Rezvanianzadeh, M.R. Identification of the hydrogeochemical processes and assessment of groundwater in a semi-arid region using major ion chemistry: A case study of Ardestan basin in Central Iran. **Groundwater for Sustainable Development**, n.6, p. 245-254, 2018.

Richards, L.A. **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils**. Washington: US Department of Agriculture, 1954. 160p. USDA Agricultural Handbook, 60.

Rivetti, M.O.; Budimir, L.; Mannix, N.; Miller, A.V.B.; Addizon, M.J.; Moyo, P.; Wanangwa, G.J.; Phiri, O.L.; Songola, C.E.; Nhlema, M.; Thomas, M.A.S.; Polmanteer, R.T.; Borge, A.; Kalin, R.M. Responding to salinity in a rural African alluvial valley aquifer system: To boldly go beyond the world of hand-pumped groundwater supply? **Science of the Total Environment**, v.653, p.1005–1024, 2019.

Sawyer, G.N. and McCarthy, D.L. **Chemistry of Sanitary Engineers**. 2nd Edition, McGraw Hill, 1967, 518p., New York.

Slama, T.; Sebei, A. Spatial and temporal analysis of shallow groundwater quality using GIS, Grombalia aquifer, Northern Tunisia. **Journal of African Earth Sciences**, n.170, p.1-17, 2020.

Souza, E. R.; Montenegro, A. A. A.; Andrade, T. S.; Montenegro, S. M. G. L. Análise temporal da estrutura de dependência espacial da salinidade em aluvião no semiárido. **In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola**, n.35, 2006, João Pessoa. Anais. João Pessoa: SBEA, 2006. CD Rom

Subramani, T.; Elango, L.; Damodarasamy, S.R. Groundwater quality and its suitability for drinking and agricultural use in Chithar River Basin, Tamil Nadu, India. **Environmental Geology**, v.47, p. 1099-1110, 2005.

Tomaz, A.; Palma, P.; Fialho, S.; Lima, A.; Alvarenga, P.; Potes, M.; Salgado, R. Spatial and temporal dynamics of irrigation water quality under drought conditions in a large reservoir in Southern Portugal. **Environmental Monitoring and Assessment**, v.192, n.93, p.1-17, 2020.

Vauclin, M.; Vieira, S. R.; Vachaud, G.; Nielsen, D. R. The use of cokriging with limited field soil observations. **Soil Science Society of America Journal**, v.47, p.175-184, 1983.

Warrick, A. W.; Nielsen, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field **In: Hillel, D. Applications of soil physics**. New York: Academic, p.319-34, 1980.

## CAPÍTULO IV

---

Almeida, T. A. B. Variabilidade espacial no cultivo do milho irrigado com efluente doméstico. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2020.

### Resumo

Na região semiárida, a utilização de água residuária na agricultura é uma alternativa de alto potencial para convivência com a escassez hídrica. Assim, o presente estudo objetivou avaliar a variabilidade espacial de atributos de solo e planta em parcelas experimentais cultivadas com milho irrigado com efluente doméstico tratado e aplicação de lodo de esgoto. O estudo foi realizado em campo no período de maio a setembro de 2016, em unidade piloto experimental de reúso, em Pesqueira, Pernambuco, Brasil. Foram instaladas duas parcelas experimentais com os seguintes tratamentos: água residuária com lodo e água residuária sem lodo. Foram analisados 40 pontos amostrais em parcelas com 40 m<sup>2</sup> (4 x 10 m), sendo os atributos de solo e planta amostrados a cada 1 m. Os atributos avaliados foram: altura de planta, diâmetro do colmo, número de folhas, umidade do solo, condutividade elétrica, carbono orgânico, teor de sódio e potássio. A presença do lodo reduziu o teor de sais e promoveu um incremento no teor de matéria orgânica do solo, reduzindo o risco de salinização proveniente da irrigação com esgoto doméstico tratado e proporcionando maior crescimento em diâmetro ao vegetal. Os parâmetros biométricos não apresentaram dependência espacial, na escala adotada. A umidade do solo, condutividade elétrica, teor de areia, argila e o teor de sódio e potássio apresentaram forte dependência espacial no tratamento com aplicação de lodo de esgoto.

**Palavras-chave:** reúso hidroagrícola, gotejamento, geoestatística

Almeida, T. A. B. Spatial variability of soil attributes in cultivation of maize fertigated with wastewater. Thesis (Master's degree in Agricultural Engineer) – Federal Rural University of Pernambuco, 2020.

### **Abstract**

Water scarcity is one of the main factors limiting agricultural crop productivity. In the semiarid region, the use of wastewater in agriculture is of high potential alternative to cope with water scarcity. However, due to the physicochemical properties of domestic wastewater, soil attributes and soil quality may change. Thus, the present study aimed to evaluate the spatial variability and impact of the use of wastewater and sewage sludge on soil attributes in an irrigated corn planting in the northeastern semiarid. The study was conducted from May to September 2016 at the experimental pilot reuse unit in Pesqueira-PE, Brazil. Two experimental plots were installed at the study area with the following treatments: Wastewater and Sludge, and only irrigation with Wastewater. Two grids with 40 points of 4 x 10 m mesh, with a spacing of 1 m were established for soil sampling, and biometric evaluation. The presence of sludge reduced the salt content and promoted an increase in the soil organic matter content, reducing the risk of salinization due to irrigation with treated domestic sewage and providing greater robustness to the vegetable. The biometric parameters showed no spatial dependence. Soil moisture, electrical conductivity, sand, clay content and sodium and potassium content showed strong spatial dependence for the treatment with sewage sludge application.

## 1 INTRODUÇÃO

O cultivo do milho no semiárido brasileiro destaca por sua importância econômica na agricultura familiar, observando-se elevado contraste de produtividade decorrente principalmente das condições climáticas, práticas de irrigação e adubação (SERPA et al., 2012; ALVES et al., 2018).

Devido à escassez hídrica na região, o uso de águas residuárias na irrigação é uma alternativa para a redução do consumo de água de melhor qualidade, e atenuação da contaminação ambiental (SALGADO et al., 2018). Alves et al. (2018), investigando a influência de diferentes doses de água residuária, associadas a adubação mineral, no crescimento e produção vegetal no cultivo do milho, constataram que a aplicação da água residuária não influenciou na produtividade vegetal. Gaspar et al. (2020) avaliaram que o desenvolvimento de Capim Citronela irrigado com esgoto doméstico tratado oriundo de uma estação de tratamento tipo UASB proporcionou um maior potencial de aproveitamento dos nutrientes quando comparado com o irrigado com água de abastecimento. Martins et al. (2018), avaliando o efeito de diferentes proporções de composto orgânico contendo lodo de esgoto na composição de substrato para o desenvolvimento inicial de plantas de milho em casa de vegetação constataram que a aplicação do lodo no substrato promoveu um maior desenvolvimento na produção das plantas de milho, resultando em um maior diâmetro caulinar, crescimento de planta, número de folhas e aumento da matéria seca. Examinando o uso do lodo de esgoto como fertilizante na cultura domilho, em Latossolo Vermelho, Bremm et al. (2012) verificaram que o lodo de esgoto apresentou como fertilizante influências positivas no desenvolvimento da cultura do milho, constituindo-se como alternativa para o uso de fertilizantes minerais tanto do ponto de vista econômico quanto ambiental. Carvalho et al. (2020) constataram o elevado potencial de efluente doméstico e lodo oriundos de reator UASB no desenvolvimento de girassol, milho e sorgo.

Apesar do fornecimento de nutrientes, o reúso de água e lodo de esgoto pode comprometer a qualidade agronômica do solo (Barbosa et al., 2018), devendo ser avaliados visando a sustentabilidade agrícola da área. Um maior rendimento na produção agrícola requer conhecimento sobre a variabilidade espacial das culturas e atributos do solo, possibilitando assim determinar zonas de manejo específicas (Buss et al., 2019). A análise geoestatística tem sido uma técnica adequada para a análise de incertezas (Siqueira et al.,

2019), permitindo a identificação das variáveis que apresentam correlação espacial em diferentes condições de manejo (Carvalho et al., 2019).

Neste contexto, o presente estudo objetivou avaliar a utilização de efluente doméstico tratado e lodo de esgoto em um plantio de milho irrigado, investigando-se a distribuição espacial da salinidade do solo, bem como a dependência espacial dos atributos do solo e vegetal, no semiárido nordestino.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Área de estudo

O estudo foi conduzido na Unidade Experimental Demonstrativa de Tratamento de Esgoto e Reúso Hidroagrícola Distrito de Mutuca, município de Pesqueira (Pernambuco, Brasil) (Figura 1). O solo da área de estudo é um Planossolo Háptico Sílico Sódico Hipereutrófico (Santos et al., 2017). E o clima da região, segundo Köppen, é BSHW semiárido quente.

A Unidade Demonstrativa foi construída pela Prefeitura de Pesqueira, em parceria com a Secretaria de Recursos Hídricos Estado, cabendo à UFRPE conduzir atividades de reúso hidroagrícola do esgoto tratado, contribuindo assim para convivência produtiva com a escassez hídrica e a gestão ambiental no semiárido.

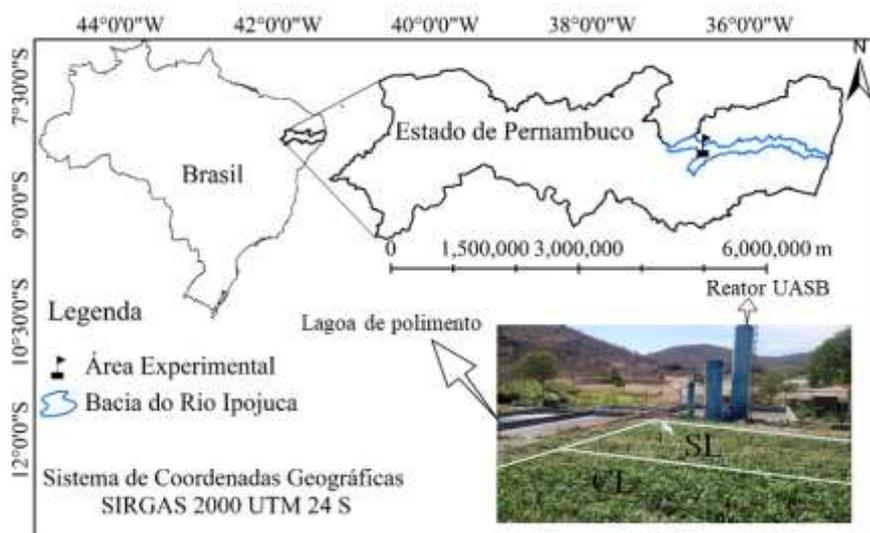


Figura 1 - Mapa da localização da unidade de tratamento de esgoto localizada da Bacia do Rio Ipojuca, no município de Pesqueira, Pernambuco, Brasil

A estação de tratamento é do tipo UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket), com lagoa de polimento instalada após a unidade de tratamento de esgoto. A estação atende a uma parte do Distrito de Mutuca correspondente a 150 residências, com uma média de 5 moradores por unidade, produzindo uma vazão média de esgoto bruto de  $3\text{m}^3.\text{dia}^{-1}$ . Duas parcelas experimentais com 40 (10 x 4) pontos de monitoramento, espaçados de 1 m, foram cultivadas com milho (Cultivar São José IPA – BR 5026) em 08 de maio de 2016, sendo semeadas três sementes por cova a uma profundidade de 2,5 cm. As fileiras foram espaçadas de 1 m e as plantas de 1 m umas das outras, adotando-se os seguintes tratamentos: cultivo de milho irrigado com água residuária sem lodo (SL) e milho irrigado com água residuária e aplicação de lodo de esgoto estabilizado (CL). As características do efluente tratado estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1 – Avaliação inicial dos atributos químicos do efluente doméstico tratado utilizado ao longo do período experimental e do logo aplicado no tratamento.

<b>Efluente tratado</b>		<b>Lodo</b>	
pH	8,3	pH em água	6,5
Sólidos totais dissolvidos ( $\text{mg L}^{-1}$ )	2869	Areia ( $\text{g Kg}^{-1}$ )	755
Ferro Total ( $\text{mg L}^{-1}$ )	< 0,01	Argila ( $\text{g Kg}^{-1}$ )	110
Manganês Total ( $\text{mg L}^{-1}$ )	0,05	C ( $\text{g Kg}^{-1}$ )	53,5
Fósforo Total ( $\text{mg L}^{-1}$ )	2	N ( $\text{g Kg}^{-1}$ )	4,2
Nitrogênio Total ( $\text{mg L}^{-1}$ )	23,6	MO ( $\text{g Kg}^{-1}$ )	92,23
$\text{Ca}^{2+}$ ( $\text{mmol L}^{-1}$ )	1,72	Ca ( $\text{cmol kg}^{-1}$ )	13,4
$\text{Mg}^{2+}$ ( $\text{mmol L}^{-1}$ )	4,19	Mg ( $\text{cmol kg}^{-1}$ )	2,8
$\text{Na}^{2+}$ ( $\text{mmol L}^{-1}$ )	34,02	K ( $\text{cmol kg}^{-1}$ )	13
$\text{K}^{+}$ ( $\text{mmol L}^{-1}$ )	2,19	CTC ( $\text{cmol kg}^{-1}$ )	19,45
$\text{Cl}^{-}$ ( $\text{mmol L}^{-1}$ )	26,79	P ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	30
$\text{SO}_4^{-}$ ( $\text{mmol L}^{-1}$ )	2,16	Cu ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	1,2
$\text{NO}_3^{-}$ ( $\text{mmol L}^{-1}$ )	0,68	Fe ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	56,5
$\text{CO}_3^{2+}$ ( $\text{mmol L}^{-1}$ )	2	Zn ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	13,4
$\text{HCO}_3^{-}$ ( $\text{mmol L}^{-1}$ )	10,61	Mn ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	46,1

A Resolução nº 375, de 29 de agosto de 2006, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (Resolução CONAMA nº 375/06) (BRASIL, 2006) define critérios em relação ao

uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário, estabelecendo limites para as concentrações de zinco, cobre e manganês de 2800, 1500 e 50 mg Kg<sup>-1</sup>. A resolução, também exige o monitoramento de substâncias orgânicas no lodo, não sendo especificados limites máximos de concentração.

O monitoramento dos dados meteorológicos foi realizado diariamente em estação meteorológica automática da ONSET, locada na Unidade Piloto. Durante o experimento a precipitação total foi de 117,2 mm, a temperatura média foi de 23,2 °C, variando de 15,4 a 35,9 °C e a evapotranspiração de referência, calculada pelo método de Penman-Monteith, foi de 416 mm. O método de irrigação utilizado foi o localizado por gotejamento, tipo Xique-Xique. A lâmina de irrigação aplicada foi calculada a fim de suprir a necessidade hídrica vegetal da cultura, com turno de rega de dois dias.

Aos 118 dias após a semeadura (DAS), foi realizada a avaliação biométrica das plantas através das variáveis: altura de planta (ALT), diâmetro de colmo (D) e número de folhas (NF), seguindo a metodologia utilizada por Borges et al. (2014). Em relação aos parâmetros relacionados ao solo, a umidade do solo (UG) foi avaliada pelo método gravimétrico e a condutividade elétrica (CE) foi obtida através da leitura da solução do solo e a textura do solo pelo método do Densímetro de Bouyoucos (EMBRAPA, 2011). O parâmetro biológico foi mapeado através da investigação da dinâmica espacial da matéria orgânica (MO) avaliada segundo o Método de Yeomans & Bremner (1998). O aspecto químico do solo foi avaliado pelos teores de sódio (Na) e potássio (K) determinados pelo método da fotometria de chama.

## **2.2 Análise estatística e geoestatística**

Os parâmetros avaliados ao 118 dias após a semeadura (DAS) foram submetidos a análise estatística clássica e a normalidade, avaliada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov ao nível de significância de 5%. Os dados foram submetidos, também, à análise de variância, aplicando-se a hipótese de nulidade do teste F. A variabilidade foi classificada, segundo Warrick & Nielsen (1998), em baixa ( $CV \leq 12\%$ ); média ( $12 < CV \leq 60\%$ ) e alta ( $CV > 60\%$ ). O grau de associação entre as variáveis foi verificada através da correlação de Spearman.

Para a análise geoestatística foi utilizada a ferramenta computacional GEOEAS. De posse do semivariograma experimental, foram testados os modelos teóricos exponencial, gaussiano e esférico. Os valores discrepantes foram filtrados segundo o critério de Hoaglin et al. (1983). Foi escolhido aquele modelo que apresentou melhor ajuste aos valores experimentais, segundo a técnica de Jack-Knifing (Vauclin et al., 1983), em que cada um dos valores medidos é interpolado pelo método da krigagem, e os valores medidos então são substituídos pelos estimados e calculada, em seguida, a distribuição dos erros padronizados, a qual deve apresentar média próximo a zero e desvio-padrão unitário (Montenegro & Montenegro, 2006). Após a validação do semivariograma, foi realizada a krigagem dos dados e os mapas de isolinhas foram confeccionados.

O Índice de Dependência Espacial (IDE) foi calculado de acordo com Cambardella et al. (1994), como a razão entre o efeito pepita e o patamar dos semivariogramas teóricos. Este critério estabelece uma forte dependência quando uma determinada razão é inferior a 25%, moderada para uma razão entre 25 e 75%, e fraca quando a razão é superior a 75%.

Para as variáveis que não apresentaram dependência espacial, o mapeamento foi realizado utilizando o inverso da potência da distância (IDW), que realiza a estimativa da variável ao longo do espaço, ponderando pesos a cada um dos  $n$  pontos mais próximos (Di Piazza et al., 2011), ou seja, quanto mais próximo do ponto a ser estimado maior o peso atribuído ao ponto amostrado. No presente estudo foi adotada uma função do inverso de uma potência 2 da distância, ou seja, foi utilizado o Inverso Quadrado da Distância (IQD).

### **3 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Na Figura 2 estão representados os Box-plots da umidade do solo (UG), condutividade elétrica (CE), quantidade de matéria orgânica (MO) disponível no solo, teor de sódio (Na) e potássio (K), teor de areia (ARE) e argila (ARG), altura do vegetal (ALT), diâmetro colmo (D) e o número de folhas (NF) para as parcelas com lodo (CL), e sem aplicação de lodo (SL).

A UG na parcela CL apresentou assimetria negativa e amplitude de dados maior em relação à umidade da parcela SL.

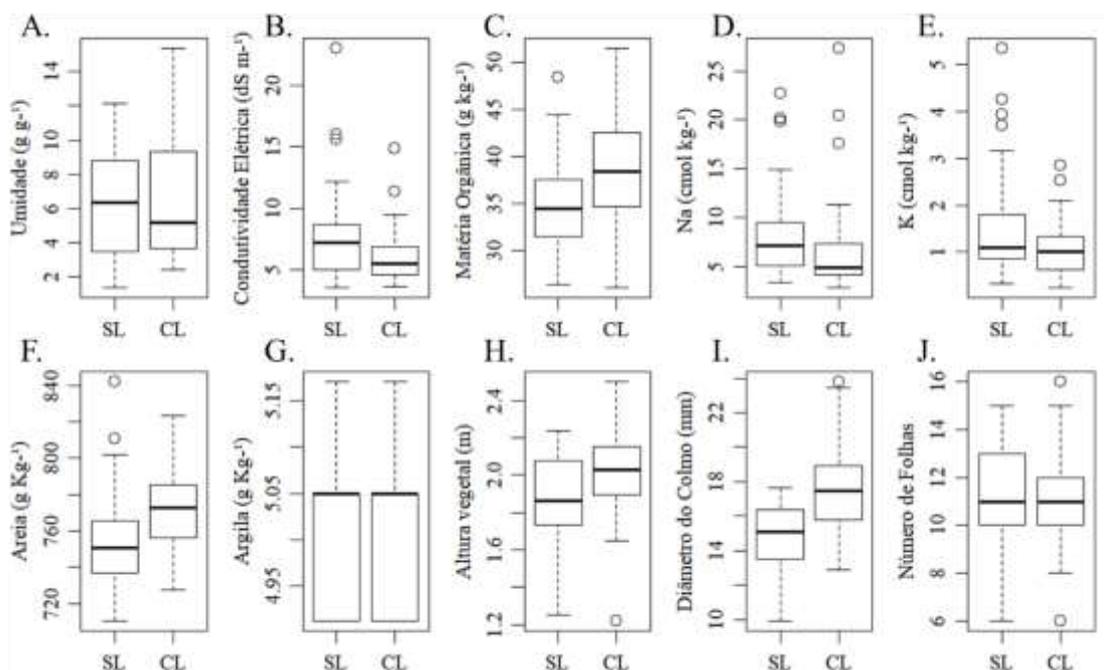


Figura 2 - Box plots com linhas médias para umidade do solo (A), condutividade elétrica (B), matéria orgânica (C), sódio (D), potássio (E), areia (F), argila (G), altura do vegetal (H), diâmetro colmo (I) e número de folhas (J), para o tratamento SL e CL.

A condutividade elétrica e a concentração de sódio tiveram resultados semelhantes, com os maiores valores sendo observados em SL. Observou-se também que concomitante ao aumento na condutividade elétrica do solo, uma maior disponibilidade de Na também foi encontrada, corroborando com estudo desenvolvido por Barbosa et al. (2018), ao avaliar os atributos e a qualidade do solo irrigado com esgoto doméstico tratado em cultivo de cana-de-açúcar.

Em relação à matéria orgânica (MO), observa-se que o primeiro e o terceiro quartil exibem uma simetria adequada em torno do valor da mediana, que é consistente com a hipótese de distribuição Normal. A MO média da parcela CL ( $38,64 \text{ g kg}^{-1}$ ) foi 10% maior em relação à parcela SL ( $35,11 \text{ g kg}^{-1}$ ), o que segundo Maio et al. (2011), a aplicação do lodo de esgoto possibilita um acréscimo nos teores de matéria orgânica no solo, o que torna o solo mais propício para o desenvolvimento de culturas agrícolas.

Todas as variáveis, com exceção do K CL, apresentaram comportamento Normal a 0,05 do nível de probabilidade no teste de Kolmogorov-Smirnov. A variável não Normal foi normalizada pela transformação logarítmica. A Tabela 2 apresenta as estatísticas clássicas e o

Índice de dependência espacial para atributos físicos do solo e variáveis de desenvolvimento de culturas para ambas as parcelas experimentais.

As variáveis da planta D, NF e ALT apresentaram médias SL (14,86; 10,85; 1,09) e CL (17,52; 11,08; 1,1) inferiores à encontrada por Carvalho et al. (2019), utilizando a mesma cultivar em regime de sequeiro, sendo cultivada no mesmo período em um Argissolo Vermelho Amarelo, sob condição de solo descoberto (14,64; 10,52; 1,44) e com cobertura morta de pó de coco (18,08; 11,82; 1,75). O crescimento inferior está atrelado ao alto teor de sais proveniente da irrigação com água residuária, o que mesmo aumentando a disponibilidade hídrica, gerou um estresse salino a cultivar.

Tabela 2 - Estatísticas clássicas das variáveis observadas no desenvolvimento do milho, para o tratamento sem lodo (SL) e com lodo (CL).

Variáveis	Média		p	CV (%)		IDE (%)	
	SL	CL		SL	CL	SL	CL
UG	6,41	6,43	0,33	50,01	52,54	9,76	12,74
CE	7,73	6,16	0,02	48,23	37,67	12,04	46,72
MO	35,11	38,64	0,005	13,22	15,64	27,97	-
Na	8,05	6,61	0,01	56,07	74,62	13,53	34,60
K	1,55	1,07	0,08	71,62	54,53	33,44	37,93
ARE	753,70	772,33	0,001	3,56	3,02	11,10	8,53
ARG	153	148	0,07	8,13	7,98	-	23,15
D	14,86	17,52	0,02	13,38	13,27	-	-
NF	10,85	11,08	0,01	19,86	18,10	13,31	-
ALT	1,09	1,10	0,08	17,64	13,67	-	-

CV – coeficiente de variação (%); IDE – índice de dependência espacial (%); UG – umidade gravimétrica (g g<sup>-1</sup>); CE – condutividade elétrica (dS m<sup>-1</sup>); MO – matéria orgânica (g kg<sup>-1</sup>); NA – sódio (cmol kg<sup>-1</sup>); K- potássio (cmol kg<sup>-1</sup>); ARE- teor de areia (g kg<sup>-1</sup>); ARG- teor de argila (g kg<sup>-1</sup>); D – diâmetro (mm); NF – número de folhas (unidade); ALT – altura do vegetal (m); significativo pelo teste F (p <0,05); não significativo pelo teste F (p > 0,05)

Não se constatou diferença significativa na UG para as condições de cultivo (SL e CL). Mota (2016) também não constatou diferença significativa em tratamento com aplicação

do lodo em relação à sem aplicação, porém observaram a estabilização da UG média ao longo do tempo com o uso de lodo de esgoto aplicado ao solo.

A MO apresentou aumento significativo no tratamento CL. Resultados semelhantes de acréscimo no teor de matéria orgânica também foram encontrados por Trannin et al. (2008), quando avaliaram os efeitos da aplicação de um bio sólido ao solo sob vegetação de *Brachiaria* sp. Segundo Bonini et al. (2015), a matéria orgânica produz efeitos positivos no suprimento dos nutrientes para as plantas, na estrutura, e na capacidade de retenção de água, estando diretamente ligada com a qualidade e a fertilidade do solo.

Constatou-se diferença estatística para CE de acordo com o teste F a 5% de probabilidade. O seu valor médio nas parcelas CL foi 25% menor do que o valor encontrado nas parcelas SL. Estudos relativos à dinâmica da CE têm apontado sua relação com a textura (MOLIN; RABELLO, 2011) e com o teor de matéria orgânica (CARMO; SILVA, 2016). Como o lodo desta unidade de tratamento tem característica franco-arenosa, e apresenta em sua composição mais de 70% de areia, houve um incremento na capacidade drenante do solo como demonstrado por Menezes e Matos (2018), que atribuíram a elevação do teor de areia a melhora na capacidade de drenagem de sais do solo, servindo assim como impedimento para retenção de sais na camada superior.

O teor de  $\text{Na}^+$  no tratamento CL apresentou média significativamente menor, quando comparado com a parcela SL. Tais resultados são promissores, tendo em vista que dentre as características sódicas salinas que podem comprometer a qualidade agrônômica do solo, o incremento de  $\text{Na}^+$  é um dos principais agravantes (BARBOSA et al., 2018). A mudança nos teores de  $\text{K}^+$  e ARG não foram significativos entre tratamentos.

O diâmetro do colmo na parcela CL apresentou média significativamente maior, de acordo com o teste F a 5% de probabilidade, do que o tratamento SL. Tal aumento, para Petter et al. (2016), é um importante resultado não apenas para a estrutura de sustentação do milho, como também para a estrutura de armazenamento de açúcares e nutrientes, que serão utilizados no crescimento e enchimento dos grãos. Os nutrientes disponíveis no lodo apresentam-se em elevadas concentrações, de modo a satisfazer às necessidades nutricionais da planta, como destacado na Tabela 1.

A ALT, o D e o NF apresentaram coeficientes de variação inferiores nas parcelas CL, porém todos classificados como médio CV. Carvalho et al. (2019) encontraram menores valores de CV para altura da planta e número de folhas nas condições de solo descoberto em

relação à parcela com solo com cobertura natural, em condições de cultivo de sequeiro no mesmo período de cultivo, no Agreste pernambucano. Os teores de  $K^+$  foram classificados como alto CV na parcela CL e na concentração de  $Na^+$  classificado como alto na parcela SL. Os demais apresentaram baixo CV.

Elevado coeficiente de correlação de Spearman foi encontrado para umidade do solo (UG) e a variável de crescimento diâmetro (D) para a cultura na parcela CL, com coeficiente de 69%. Uma alta correlação também se apresentou entre UG e CE nas parcelas SL e CL, e entre os valores de CE, Na e K, com coeficientes superiores a 72%. Constatou-se também uma elevada correlação entre as variáveis texturais e a MO do solo, onde a ARG e a MO apresentaram coeficiente de correlação de -51%, o que estabelece que quanto menor o teor de argila na área, maior o teor de matéria orgânica.

O uso agrícola de lodo de esgoto está relacionado com a adição de areia, nutrientes e matéria orgânica ao solo. A resposta vegetal é semelhante à de uma adubação orgânica, que segundo Hurtado et al. (2009), promove uma diminuição da dependência espacial da produção de milho. Entretanto, as variáveis relacionadas ao solo apresentaram entre forte e moderada dependência, de acordo com o IDE significando que tais medidas não foram distribuídas aleatoriamente nas parcelas experimentais. Foi constatada dependência espacial apenas para NF na condição SL. As demais variáveis da planta não apresentaram dependência.

Semivariogramas experimentais e teóricos são apresentados na Figura 3 para os atributos físicos do solo e variáveis biométricas do milho, no tratamento sem a presença (SL) e com a presença de lodo de esgoto (CL).

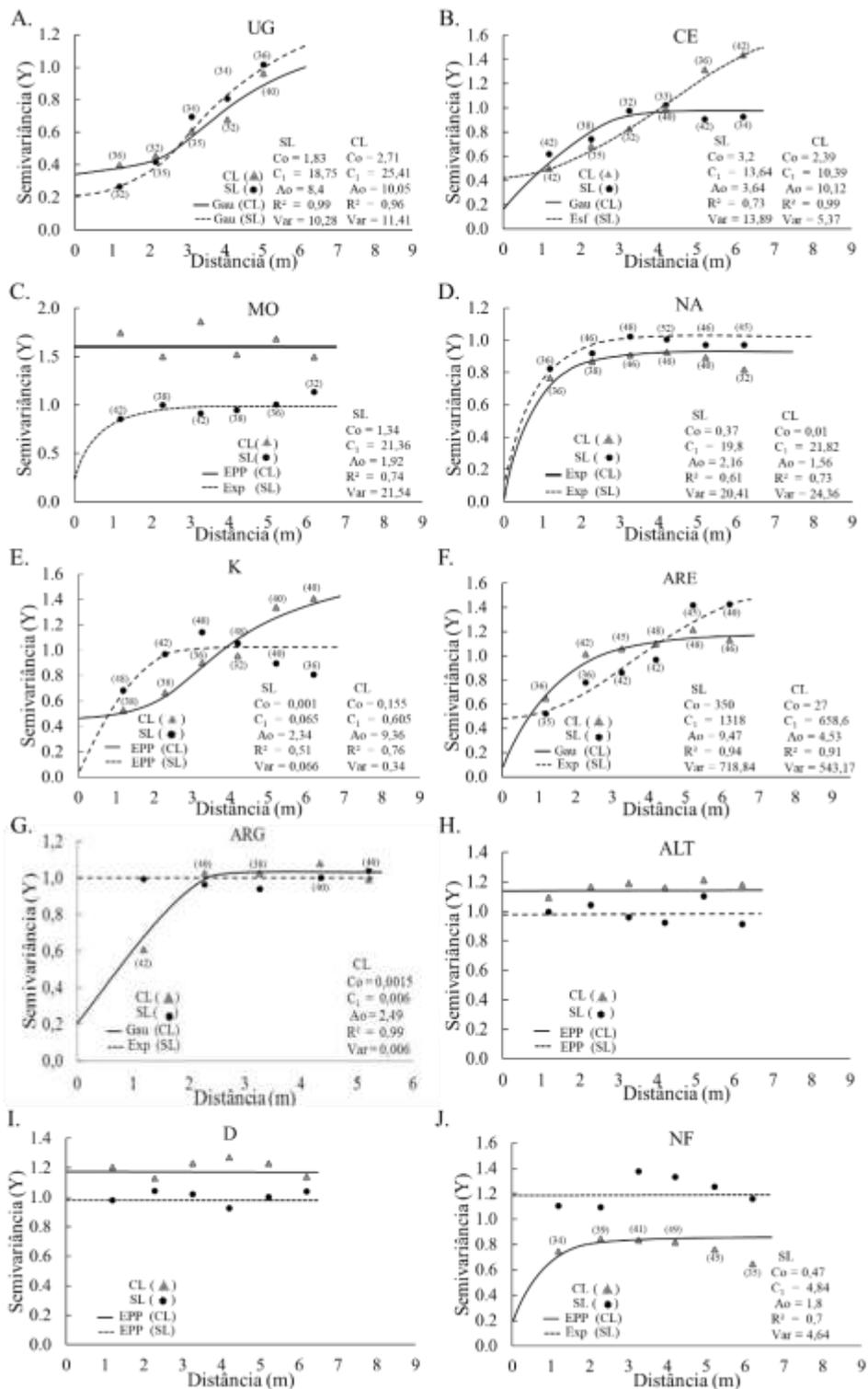


Figura 3 - Semivariogramas experimentais e teóricos em escala para a umidade gravimétrica ( $\text{g g}^{-1}$ ) (a); condutividade elétrica ( $\text{dS m}^{-1}$ ) (B); matéria orgânica ( $\text{g kg}^{-1}$ ) (C); sódio ( $\text{cmol kg}^{-1}$ ) (D); potássio ( $\text{cmol kg}^{-1}$ ) (E); teor de areia ( $\text{g.Kg}^{-1}$ ) (F); teor de argila ( $\text{g.Kg}^{-1}$ ) (G); altura do vegetal (m) (H); diâmetro (mm) (I) e número de folhas (J).

A UG e a CE apresentaram comportamento gaussiano em ambos os tratamentos. Houve um decréscimo na escala de dependência da unidade gravimétrica do solo, quando o lodo foi aplicado, devido a uma maior uniformização da área. Para a CE, o  $\text{Na}^+$  e o  $\text{K}^+$ , a escala de dependência aumentou com aplicação do lodo. Para a MO, na parcela SL não foi observado patamar e a parcela CL não apresentou dependência.

Dos parâmetros biométricos, apenas o NF, na condição SL, exibiu dependência; os demais apresentaram um padrão de efeito de pepita puro. Os semivariogramas para as variáveis UG, CE,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ , ARE e ARG foram validados de acordo com o critério de Jack-Knifing, com o desvio padrão próximo a um para SL (0,986, 1,016, 0,904, 1,186, 0,987, 1,042, 1,116) e CL (1,130, 1,109, 0,999, 1,281, 1,082, 0,946, 1,035), bem como, os erros médios próximos a zero de SL (-0,040, 0,008, 0,047, -0,038, 0,024, -0,004, -0,004) e CL (0,013, 0,014, 0,005, 0,031, 0,012, 0, -0,001).

De acordo com os semivariogramas, os parâmetros do solo em ambas as condições de tratamento não apresentaram patamar. Isto se dá em função do tamanho da área amostral não ser suficiente para a obtenção de valores independentes. O mapeamento por krigagem das propriedades do solo e das variáveis vegetais nas parcelas CL e SL estão ilustrados na Figura 4.

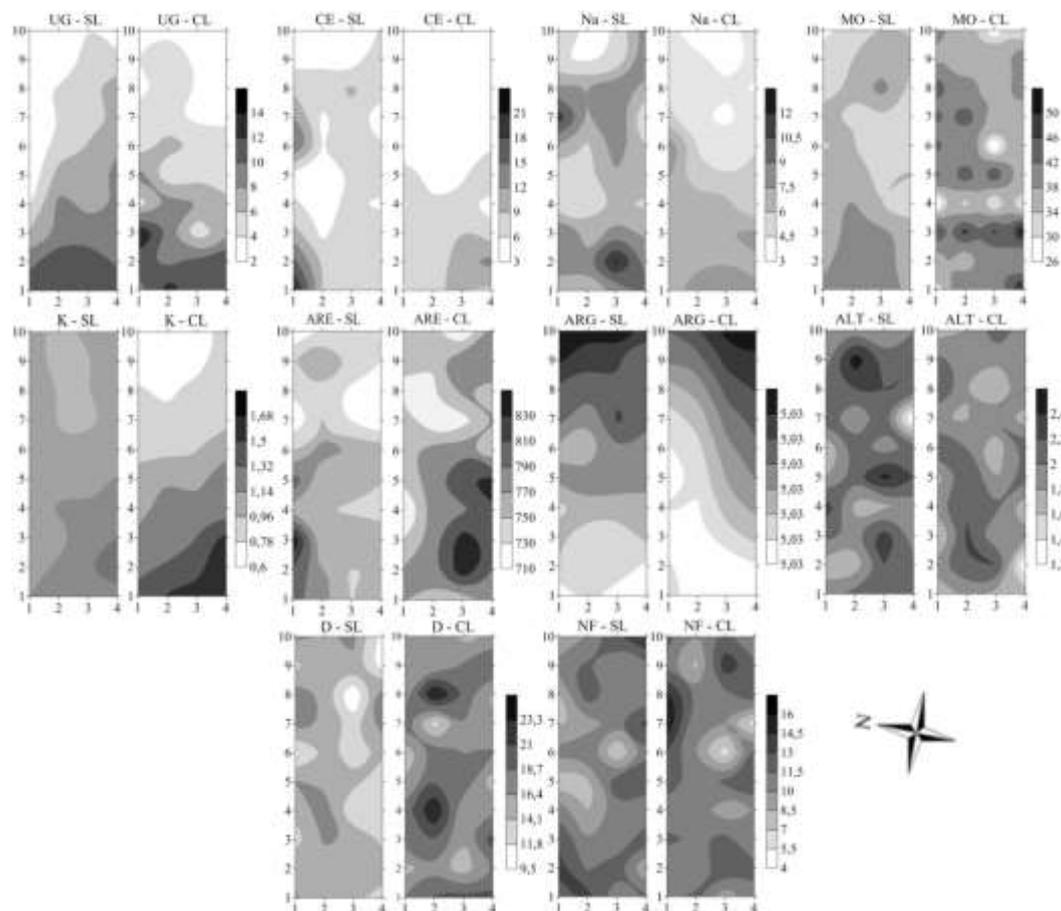


Figura 4 - Mapas de krigagem para a umidade gravimétrica - UG – umidade gravimétrica ( $\text{g g}^{-1}$ ); CE – condutividade elétrica ( $\text{dS m}^{-1}$ ); MO – matéria orgânica ( $\text{g kg}^{-1}$ ); Na – sódio ( $\text{cmol kg}^{-1}$ ); K- potássio ( $\text{cmol kg}^{-1}$ ); ARE- teor de areia ( $\text{g Kg}^{-1}$ ); ARG- teor de argila ( $\text{g kg}^{-1}$ )

Observa-se que a área com maior valor de UG localizou-se na parte inferior da parcela SL e CL, apresentando forte relação com os dados de CE, com coeficiente de correlação de Spearman de 71%, devido aos valores mais elevados na porção onde concomitantemente apresentou maior valor de UG. Segundo Molin & Rabelo (2011), a variabilidade espacial da CE no solo, além de ser atribuída ao teor de sais encontrados na água de irrigação, pode ser também influenciada pelo conteúdo de argila no solo, de modo que as argilas retêm mais água e também conduzem mais eletricidade que areia ou silte. Nesse contexto, o maior teor de areia nestas áreas promoveu maior lixiviação de sais, principalmente do  $\text{K}^+$ , permitindo a formação de faixas que correspondem a menores porções de sais na camada superior do solo.

As maiores concentrações do íons  $\text{Na}^+$  ocorreram nas regiões que apresentaram maior valor de CE. De semelhante modo, o  $\text{K}^+$  apresentou dinâmica espacial similar ao  $\text{Na}^+$ , apresentando uma maior concentração nas áreas com maior disponibilidade de água.

## 4 CONCLUSÕES

1. A aplicação do efluente doméstico tratado não apresentou riscos ambientais de salinização para os lotes experimentais, sendo útil na manutenção dos cultivos agrícolas e importante para a redução da pressão hídrica de melhor qualidade na região;
2. A aplicação do lodo de esgoto no solo funcionou como uma cobertura não inerte, proporcionando áreas com maior teor de umidade e proporcionado ao vegetal uma melhor condição de desenvolvimento;
3. O milho cultivado com a adição de lodo apresentou desenvolvimento superior, em termos de diâmetro, em relação ao cultivo apenas com água residuária;
4. A adição de lodo de esgoto tratado diminuiu o valor da condutividade elétrica do solo e favoreceu o incremento do teor de matéria orgânica, o que se refletiu em um crescimento superior do milho manejado com lodo;
5. O presente estudo demonstrou a possibilidade e o potencial de reúso de efluente tratado para agricultura no semiárido, configurando-se como uma fonte potencial de água e nutrientes, que além de reduzir a pressão hídrica da região reduz a contaminação de corpos hídricos locais.

## REFERÊNCIAS

Alves, P. F. S.; Santos, S. R. S.; Kondo, M. K.; Araújo, E. D.; Oliveira, P. M. Fertirrigação do milho com água residuária sanitária tratada: crescimento e produção. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.23, p. 833-839, 2018.

Barbosa, E.A.A.; Matsura, E.E.; Santos, L.N.S.; Nazário, A.A.; Gonçalves, I.Z.; Feitosa, D.R.C. Soil attributes and quality under treated domestic sewage irrigation in sugarcane. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.22, p.137-142, 2018.

Bonini, A. S. B.; Alves, M. C.; Montarani, R. Lodo de esgoto e adubação mineral na recuperação de atributos químicos de solo degradado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, p.388–393, 2015.

Borges, T.K.S.; Montenegro, A.A.A.; Santos, T.E.M.; Silva, D.D.; Silva Júnior, V.P. Influência de práticas conservacionistas na umidade do solo e no cultivo do milho (*Zea mays* L.) em semiárido nordestino. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v.38, p.1862-1873, 2014.

BRASIL. Resolução Conama nº 375. MMA: Brasília, 2006. 32p.

Bremm, R.R.R.; Damasceno, S.G.; Secco, D. Boas, M.A.V.; Torres, D.G.B.; Mess, J.B.R.; Kummer, L. Potencial de uso de lodo de esgoto na cultura do milho em latossolo argiloso no oeste do Paraná. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, n.23, p.17-24, 2012.

Buss, R. N.; Silva, R. A.; Siqueira, G. M.; Leiva, J. O. R.; Oliveira, O. C. C.; França, V. L. Spatial and multivariate analysis of soybean productivity and soil physical-chemical attributes. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.23, p.446-453, 2019.

Cambardella, C. A.; Moorman, T. B.; Novak, J. M.; Parkin, T. B.; Karlen, D. L.; Turco, R. F.; Konopka, A. E. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa Soils. **Soil Science Society of American Journal**, v.58, p.1501-1511, 1994.

Carmo, D.L.; Silva, C.A. Condutividade elétrica e crescimento do milho em solos contrastantes sob aplicação de diversos níveis de calagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília**, v.51, n.10, p.1762-1772, 2016.

Carvalho, A. A.; Montenegro, A. A. A.; Assis, F. M. V.; Tabosa, J. N.; Cavalcanti, R. Q.; Almeida, T. A. B. Spatial dependence of attributes of rainfed maize under distinct soil cover conditions. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.23, p.33-39, 2019.

Di Piazza, A.; Conti, F.L.; Noto, L.V.; Viola, F.; La Loggia, G. Comparative analysis of different techniques for spatial interpolation of rainfall data to create a serially complete monthly time series of precipitation for Sicily, Italy. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v.13, p. 396 – 408, 2011.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise de solo. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos**, 230p., 2011.

Gaspar, G.V.; Bezerra, F.M.L.; Mota, F.S.B. Desenvolvimento de citronela (*Cymbopogon Winterianus*) irrigada com esgoto doméstico tratado e com água de abastecimento. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, v.55, n.1, p.145-157, 2020.

Gomes, S.B.V.; Nascimento, C.W.A.; Biondi, C.M. Produtividade e composição mineral de plantas de milho em solo adubado com lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, v.11, p.459-465, 2007.

Henrique, I. N.; Sousa, J. T.; Ceballos, B. S. O.; Brasil, D. P. Remoção biológica de fósforo em reatores em bateladas sequenciais com diferentes tempos de retenção de sólidos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 15, p. 197-204, 2010.

Hurtado, S. M. C.; Silva, C. A.; Resende, A.V.; Von Pinho, R. G.; Inácio, E. S. B.; Higashikawa, F.S. Spatial variability of soil acidity attributes and the spatialization of liming requirement for corn. **Ciência e Agrotecnologia**, v.33, p.1351-1359, 2009.

Maio, M. M.; Sampaio, R. A.; Nascimento, A. L.; Prates, F. B. S.; Rodrigues, M. N.; Silva, H. P.; Dias, A. N.; Freitas, C. E. S. Atributos físicos do solo, adubado com lodo de esgoto e silicato de cálcio e magnésio. **Revista Ceres**, v. 58, p. 823-830, 2011.

Martins, C.A.C.; Santos, F.S.; Portz, A.; Santos, A.M. Desenvolvimento inicial do milho (*Zea mays* L.) em substrato contendo lodo de esgoto compostado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, n.48, p.69-79, 2018.

Menezes, L. A. N. & Matos, A. T. Condutividade elétrica do solo em função da dose de aplicação de água residuária em áreas de fertirrigação. **Revista Engenharia na Agricultura**, v.26, p.383-389, 2018.

Miranda, R. J. A. **Lâminas de irrigação com água residuária e adubação orgânica na cultura do algodão BRS safira. (Tese Doutorado)**. Universidade de Federal Campina Grande, Campina Grande, 84p., 2010.

Molin, J. P.; Rabello, L. M. Estudos sobre a mensuração da condutividade elétrica do solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.31, p.90-101, 2011.

Montenegro, A. A. de 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, p.30-37, 2006.

Mota, F. D. **Lodo de esgoto compostado na produção de tapetes de grama esmeralda e na manutenção de água no solo. (Dissertação de mestrado)**. Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 65p., 2016.

Petter, F. A.; Andrade, F. R.; Zuffo, A. M.; Monteiro, M. M. S.; Pacheco, L. P.; Almeida, F. A. Doses e épocas de aplicação de potássio no desempenho agrônômico do milho no cerrado piauiense. **Comunicata Scientiae**, v.7, p.372-382, 2016.

Salgado, V. C., Souza Filho, E. J., Gavazza, S., Florencio, L., Kato, M. T. Cultivo de melancia no semiárido irrigado com diferentes lâminas de esgoto doméstico tratado. **Engenharia Sanitária Ambiental**, v.23, p. 727-738, 2018.

Serpa, M. S.; Silva, P. R. F.; Sangoi, L.; Vieira, V. M.; Marchesi, D. R. Densidade de plantas em híbridos de milho semeados no final do inverno em ambientes irrigados e de sequeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.47, p.541-549, 2012.

Siqueira, T. M.; Lonuzada, J. A. S. L.; Pedrollo, O. C.; Castro, N. M. R.; Oliveira, M.H.C. Soil physical and hydraulic properties in the Donato stream basin, RS, Brazil. Part 2: Geostatistical simulation. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.23, p.675-680, 2019.

Trannin I. C. B.; Siqueira J. O.; Moreira, F.M.S. Atributos químicos e físicos de um solo tratado com bio sólido industrial e cultivado com milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, p.223-230, 2008.

Urrea, J.; Alkorta, I.; Mijangos, I.; Epelde, L.; Garbisu, C. Application of sewage sludge to agricultural soil increases the abundance of antibiotic resistance genes without altering the composition of prokaryotic communities. **Science of the Total Environment**, n.647, p.1410–1420, 2019.

Vauclin, M.; Vieira, S. R.; Vachaud, G.; Nielsen, D. R. The use of cokriging with limited field soil observations. **Soil Science Society of America Journal**, v. 47, p.175-184, 1983.

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.

Yeomans, J. C.; Bremner, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications In Soil Science and Plant Analysis**, v.19, p.1467-1476, 1988.

## CAPÍTULO V

---

### CONCLUSÃO GERAL

Neste estudo foram obtidos resultados importantes para a gestão dos recursos hídricos no semiárido, e para o desenvolvimento de ações que visem proporcionar a convivência produtiva com a escassez hídrica:

1. A ocorrência de estabilidade temporal para o nível potenciométrico no vale aluvial do Riacho Mimoso possibilitou identificar piezômetros que representam adequadamente a média ao longo do tempo, otimizando o monitoramento contínuo da área.
2. A identificação de tendências crescentes na temperatura, evapotranspiração e reduções na precipitação anual, juntamente com o aumento na vazão de extração de água dos poços, e a tendência decrescente nos níveis piezométricos alertam para um aumento dos riscos de escassez do aquífero nos próximos anos.
3. O risco de salinidade e sodicidade variou de moderado a alto na porção central do vale, sendo necessária uma gestão especial para o controle da salinidade e sodicidade, uma vez que nesses locais as águas subterrâneas não podem ser usadas com segurança para a irrigação.
4. O mapa indicador da adequação da salinidade é capaz de auxiliar no processo de tomada de decisão, relacionado à determinação de áreas apropriadas para a irrigação na região e evitando a desertificação de áreas agrícolas em função da salinização do solo.
5. A aplicação de água residuária tratada via irrigação não proporcionou danos ambientais ao solo, no presente estudo, sendo uma estratégia viável na manutenção e incremento da produção agrícola no semiárido.
6. A adição de lodo de esgoto tratado diminuiu o valor da condutividade elétrica do solo e favoreceu o incremento do teor de matéria orgânica, o que se refletiu em um crescimento superior do milho manejado com lodo, sendo recomendável sua aplicação quando houver aplicação de efluentes como água de irrigação.