



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**FAUSTO CORREIA SALES FILHO**

**DINÂMICA SAZONAL DA ÁGUA ATMOSFÉRICA SOB DIFERENTES**  
**CONDIÇÕES CLIMÁTICAS NO CEARÁ**

**FORTALEZA**

**2024**

FAUSTO CORREIA SALES FILHO

DINÂMICA SAZONAL DA ÁGUA ATMOSFÉRICA SOB DIFERENTES CONDIÇÕES  
CLIMÁTICAS NO CEARÁ

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semiárido.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alexandre Gomes Costa.

FORTALEZA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- S155d Sales Filho, Fausto Correia.  
Dinâmica sazonal da água atmosférica sob diferentes condições climáticas no Ceará / Fausto Correia Sales Filho. – 2024.  
95 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2024.  
Orientação: Prof. Dr. Carlos Alexandre Gomes Costa.
1. Água precipitável. Umidade específica. Modelo de Harrison. I. Título.

CDD 630

---

FAUSTO CORREIA SALES FILHO

DINÂMICA SAZONAL DA ÁGUA ATMOSFÉRICA SOB DIFERENTES CONDIÇÕES  
CLIMÁTICAS NO CEARÁ

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semiárido.

Aprovada em \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Carlos Alexandre Gomes Costa (Orientador)

Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Profa. Dra. Waleska Martins Eloi

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

---

Dr. Pedro Henrique Lima Alencar

Technische Universität Berlin (TU Berlin)

---

Dra. Nazaré Suziane Soares

Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. José Carlos de Araújo

Universidade Federal do Ceará (UFC)

## RESUMO

Esta dissertação aprofunda a compreensão da dinâmica da água precipitável no Ceará, utilizando dados de 17 estações meteorológicas automáticas no período de 2003 a 2022. A análise dos dados revelou padrões distintos de distribuição da água precipitável nas regiões do litoral, serra e sertão, influenciados por fatores como pressão atmosférica, temperaturas, umidade relativa do ar e umidade específica. A zona serrana apresentou os maiores valores de água precipitável, impulsionada por condições de maior umidade e menor temperatura. O litoral, por sua vez, exibiu valores intermediários, devido à influência da umidade marítima. Já o sertão, caracterizado por temperaturas elevadas e baixa umidade, apresentou os menores valores. A análise da umidade específica, fundamental para a compreensão da água precipitável, revelou variações sazonais consideráveis, com maiores valores no outono e menores no inverno e primavera, evidenciando a diversidade climática do estado. A estação localizada no litoral (Acarau) apresentou a maior umidade específica (17,51 g/kg), enquanto a estação no sertão (Aiuaba) apresentou a menor (9,18 g/kg), evidenciando a influência da localização geográfica na dinâmica da umidade específica. O modelo de Harrison para estimativa da água precipitável mostrou-se útil para prever eventos climáticos e monitorar eventos extremos, apresentando valores mais elevados na serra (59787,0 mm/ano) e no litoral (34419,5 mm/ano), em comparação ao sertão (21973,0 mm/ano). As tendências temporais da água precipitável variaram conforme as condições climáticas. Regiões litorâneas (Acarau e Fortaleza) e de serra (Guaramiranga e Tianguá) apresentaram maiores valores de água precipitável, enquanto os valores diminuíram à medida que se adentrava o sertão cearense. A estação localizada em Morada Nova apresentou um padrão diferente do que encontrado em Crateús, mantendo o volume elevado em todos os meses. Os resultados da pesquisa corroboram a importância da compreensão dos recursos hídricos atmosféricos e da dinâmica da água na baixa troposfera, contribuindo para uma visão mais abrangente do ciclo hidrológico no Ceará. A investigação destaca a necessidade de estudos futuros com um número maior de estações meteorológicas, aprimorando a interpolação e refinando os dados de umidade específica para uma espacialização mais precisa, aprofundando ainda mais a compreensão da dinâmica da água precipitável no estado.

**Palavras-chave:** água precipitável; umidade específica; modelo de Harrison.

## ABSTRACT

This dissertation deepens the understanding of the dynamics of precipitable water in Ceará, using data from 17 automatic meteorological stations from 2003 to 2022. Data analysis revealed distinct patterns of distribution of precipitable water in the coastal, mountain and hinterland regions, influenced by factors such as atmospheric pressure, temperatures, relative humidity and specific humidity. The mountainous area presented the highest values of precipitable water, driven by conditions of higher humidity and lower temperature. The coast, in turn, exhibited intermediate values, due to the influence of maritime humidity. The backlands, characterized by high temperatures and low humidity, presented the lowest values. The analysis of specific humidity, fundamental for understanding precipitable water, revealed considerable seasonal variations, with higher values in autumn and lower values in winter and spring, highlighting the state's climatic diversity. The station located on the coast (Acará) presented the highest specific humidity (17.51 g/kg), while the station in the hinterland (Aiuaba) presented the lowest (9.18 g/kg), highlighting the influence of geographic location on the dynamics specific humidity. The Harrison model for estimating precipitable water proved to be useful for predicting climate events and monitoring extreme events, presenting higher values in the mountains (59787.0 mm/year) and on the coast (34419.5 mm/year), in comparison to the sertão (21973.0 mm/year). Temporal trends in precipitable water varied depending on climatic conditions. Coastal regions (Acará and Fortaleza) and mountains (Guaramiranga and Tianguá) presented higher values of precipitable water, while the values decreased as one entered the hinterland of Ceará. The station located in Morada Nova presented a different pattern than that found in Crateús, maintaining high volume in all months. The research results corroborate the importance of understanding atmospheric water resources and water dynamics in the lower troposphere, contributing to a more comprehensive view of the hydrological cycle in Ceará. The investigation highlights the need for future studies with a greater number of meteorological stations, improving interpolation and refining specific humidity data for more precise spatialization, further deepening the understanding of the dynamics of precipitable water in the state.

**Keywords:** precipitable water; specific humidity; Harrison model.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	Localização da área de estudo (Estado do Ceará).....	32
Figura 2 –	Localização das estações meteorológicas analisadas e seus respectivos municípios.....	33
Figura 3 –	Ilustração esquemática da coluna de água precipitável.....	36
Figura 4 –	Distribuição espacial da umidade específica diária média por estação do ano.....	41
Figura 5 –	Umidade específica média por estação do ano (2003-2022).....	42
Figura 6 –	Carta de umidade específica e classificação climática do Ceará.....	44
Figura 7 –	Carta de umidade específica e uso da ocupação do solo no Ceará.....	45
Figura 8 –	Água precipitável sob as condições climáticas do litoral para os municípios de Acaraú e Fortaleza.....	46
Figura 9 –	Água precipitável sob as condições climáticas da serra para os municípios de Guaramiranga e Tianguá.....	47
Figura 10 –	Água precipitável sob as condições climáticas do sertão para os municípios de Morada Nova e Crateús.....	48
Figura 11 –	Água precipitável sob diferentes condições climáticas no estado do Ceará.....	50
Figura 12 –	Curva de permanência da água precipitável na atmosfera sob três condições climáticas.....	52
Figura 13 –	Água precipitável na baixa troposfera sob as condições climáticas do litoral para os municípios de Acaraú e Fortaleza.....	53
Figura 14 –	Água precipitável na baixa troposfera sob as condições climáticas da serra para os municípios de Guaramiranga e Tianguá.....	54
Figura 15 –	Água precipitável na baixa troposfera sob as condições climáticas do sertão para os municípios de Morada Nova e Crateús.....	54
Figura 16 –	Matriz de correlação de <i>Pearson</i> para variáveis climáticas em Acaraú.....	57
Figura 17 –	Relação linear da água precipitável e densidade de eventos de precipitação para as condições climáticas do litoral em Acaraú.....	57

Figura 18 –	Densidade temporal da distribuição da água precipitável em Acaraú..	58
Figura 19 –	Matriz de correlação de <i>Pearson</i> para variáveis climáticas em Guaramiranga.....	59
Figura 20 –	Relação linear da água precipitável e densidade de eventos de precipitação para as condições climáticas da serra em Guaramiranga.....	59
Figura 21 –	Densidade temporal da distribuição da água precipitável em Guaramiranga.....	60
Figura 22 –	Matriz de correlação de <i>Pearson</i> para variáveis climáticas em Crateús.....	60
Figura 23 –	Relação linear da água precipitável e densidade de eventos de precipitação para as condições climáticas do litoral em Crateús.....	61
Figura 24 –	Densidade temporal da distribuição da água precipitável em Crateús..	61
Figura 25 –	Matriz de correlação de <i>Pearson</i> para variáveis climáticas em Fortaleza.....	62
Figura 26 –	Relação linear da água precipitável e densidade de eventos de precipitação para as condições climáticas do litoral em Fortaleza.....	62
Figura 27 –	Densidade temporal da distribuição da água precipitável em Fortaleza.....	63
Figura 28 –	Matriz de correlação de <i>Pearson</i> para variáveis climáticas em Tianguá.....	64
Figura 29 –	Relação linear da água precipitável e densidade de eventos de precipitação para as condições climáticas do litoral em Tianguá.....	64
Figura 30 –	Densidade temporal da distribuição da água precipitável em Tianguá.	65
Figura 31 –	Matriz de correlação de <i>Pearson</i> para variáveis climáticas em Morada Nova.....	65
Figura 32 –	Relação linear da água precipitável e densidade de eventos de precipitação para as condições climáticas do sertão em Morada Nova.....	66
Figura 33 –	Densidade temporal da distribuição da água precipitável em Morada Nova.....	66
Figura 34 –	Matriz de correlação de <i>Pearson</i> para variáveis climáticas em Acaraú (Modelo de Wanzeler).....	80

Figura 35 –	Matriz de correlação de <i>Pearson</i> para variáveis climáticas em Guaramiranga.....	80
Figura 36 –	Matriz de correlação de <i>Pearson</i> para variáveis climáticas em Crateús.....	81
Figura 37 –	Matriz de correlação de <i>Pearson</i> para variáveis climáticas em Fortaleza.....	81
Figura 38 –	Matriz de correlação de <i>Pearson</i> para variáveis climáticas em Tianguá.....	82
Figura 39 –	Matriz de correlação de <i>Pearson</i> para variáveis climáticas em Morada Nova.....	82
Figura 40 –	Modelo Wanzeler-Mota (regressão linear com densidade) Acaraú.....	85
Figura 41 –	Modelo Wanzeler-Mota (regressão linear com densidade) Guaramiranga.....	86
Figura 42 –	Modelo Wanzeler-Mota (regressão linear com densidade) Crateús....	86
Figura 43 –	Modelo Wanzeler-Mota (regressão linear com densidade) Fortaleza..	87
Figura 44 –	Modelo Wanzeler-Mota (regressão linear com densidade) Tianguá...	87
Figura 45 –	Modelo Wanzeler-Mota (regressão linear com densidade) Morada Nova.....	88
Figura 46 –	Histograma de densidade da água precipitável (Método de Wanzeler) em Acaraú.....	88
Figura 47 –	Histograma de densidade da água precipitável (Método de Wanzeler) em Guaramiranga.....	89
Figura 48 –	Histograma de densidade da água precipitável (Método de Wanzeler) em Fortaleza.....	89
Figura 49 –	Histograma de densidade da água precipitável (Método de Wanzeler) em Tianguá.....	90
Figura 50 –	Histograma de densidade da água precipitável (Método de Wanzeler) em Crateús.....	90
Figura 51 –	Histograma de densidade da água precipitável (Método de Wanzeler) em Morada Nova.....	91
Figura 52 –	Correlação de <i>Pearson</i> (Método de Wanzeler) em Acaraú.....	91
Figura 53 –	Correlação de <i>Pearson</i> (Método de Wanzeler) em Guaramiranga.....	92
Figura 54 –	Correlação de <i>Pearson</i> (Método de Wanzeler) em Crateús.....	92

Figura 55 –	Correlação de <i>Pearson</i> (Método de Wanzeler) em Fortaleza.....	93
Figura 56 –	Correlação de <i>Pearson</i> (Método de Wanzeler) em Tianguá.....	93
Figura 57 –	Correlação de <i>Pearson</i> (Método de Wanzeler) em Morada Nova.....	94

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Orvalho médio mundial por clima.....	28
Tabela 2 –	Distribuição temporal da umidade específica média (g/kg). (2003 a 2022).....	40
Tabela 3 –	Resumo estatístico das variáveis climáticas por região no Estado do Ceará.....	67
Tabela 4 –	Correlação entre as variáveis climáticas por região no Ceará (Continua).....	69
Tabela 5 –	Demonstrativo da correlação entre as variáveis - Modelo Wanzeler....	83
Tabela 6 –	Resumo estatístico das variáveis climáticas por região no Ceará.....	85

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CLP	Camada Limite Planetária
CN	Camada Noturna
CR	Camada Residual
ENOS	El Niño Oscilação Sul
ENSO	El Niño Oscilação Sul
ETC	Evapotranspiração da Cultura
ET	Evapotranspiração
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
GRACE	Gravity Recovery and Climate Experiment
MAM	Março Abril Maio
MJO	Oscilação Madden Julian
PNM	Pressão ao Nível do Mar
PWC	Coluna de Água Precipitável
TSM	Temperatura da Superfície do Mar
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>15</b>
<b>2.1</b>	<b>Água precipitável.....</b>	<b>15</b>
<b>2.2</b>	<b>Atmosfera terrestre e troposfera.....</b>	<b>17</b>
<b>2.3</b>	<b>Umidade específica.....</b>	<b>19</b>
<b>2.4</b>	<b>Pressão atmosférica.....</b>	<b>20</b>
<b>2.5</b>	<b>Densidade do ar.....</b>	<b>21</b>
<b>2.6</b>	<b>Gravidade terrestre.....</b>	<b>22</b>
<b>2.7</b>	<b>Vapor de água na atmosfera.....</b>	<b>24</b>
<b>2.8</b>	<b>Precipitação.....</b>	<b>25</b>
<b>2.8.1</b>	<b><i>Precipitação no nordeste brasileiro.....</i></b>	<b>26</b>
<b>2.8.2</b>	<b><i>Orvalho.....</i></b>	<b>27</b>
<b>2.8.3</b>	<b><i>A influência dos ventos na composição da água atmosférica.....</i></b>	<b>29</b>
<b>2.9</b>	<b>Evapotranspiração.....</b>	<b>30</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>31</b>
<b>3.1</b>	<b>Área de estudo e base de dados hidroclimáticos.....</b>	<b>31</b>
<b>3.2</b>	<b>Cálculo da umidade específica (<math>q_v</math>).....</b>	<b>34</b>
<b>3.3</b>	<b>Modelo para estimativa da água precipitável.....</b>	<b>35</b>
<b>3.4</b>	<b>Testes estatísticos.....</b>	<b>38</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>40</b>
<b>4.1</b>	<b>Estimativa da umidade específica (<math>q_v</math>).....</b>	<b>40</b>
<b>4.2</b>	<b>Estimativa da água precipitável pelo modelo de Harrison sob três diferentes condições climáticas.....</b>	<b>45</b>
<b>4.3</b>	<b>Curva de permanência da água precipitável sob três condições climáticas.....</b>	<b>51</b>
<b>4.4</b>	<b>Modelagem da água precipitável na baixa troposfera.....</b>	<b>53</b>
<b>4.5</b>	<b>Avaliação dinâmica sazonal da água precipitável sob três diferentes condições climática no estado do Ceará.....</b>	<b>57</b>
<b>4.6</b>	<b>Dinâmica da água precipitável de acordo com as condições climáticas.....</b>	<b>68</b>
<b>4.7</b>	<b>Análise de correlações entre parâmetros climáticos.....</b>	<b>68</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>70</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>71</b>
	<b>APÊNDICE A – MODELO WANZELER.....</b>	<b>78</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A água precipitável, ou água atmosférica, desempenha um papel fundamental nos sistemas climáticos e hidrológicos da Terra. Esse fenômeno natural refere-se à quantidade de precipitação, orvalho, neve, granizo ou qualquer outra forma de precipitação da atmosfera para a superfície terrestre. A compreensão da água precipitável é essencial para a análise e previsão de padrões climáticos, a gestão sustentável dos recursos hídricos e o entendimento das mudanças climáticas globais.

O estudo da água precipitável no semiárido é fundamental para a gestão eficiente dos recursos hídricos e o desenvolvimento da agricultura na região, impactando diretamente a formulação de políticas públicas e a segurança alimentar. O conhecimento sobre a água precipitável permite prever a disponibilidade de água, auxiliando no gerenciamento de reservatórios, açudes e sistemas de irrigação, otimizando o uso da água e garantindo o abastecimento da população. Essas informações também são importantes para o planejamento de obras hídricas, como barragens e sistemas de captação de água da chuva, considerando a variabilidade climática e as necessidades da região. Além disso, o estudo da água precipitável contribui para o desenvolvimento de estratégias de mitigação de desastres naturais relacionados à seca e à escassez de água, como a criação de sistemas de alerta precoce e a implementação de medidas de adaptação. As informações sobre a água precipitável são importantes para a definição de políticas de segurança hídrica, garantindo o acesso à água potável para a população e a sustentabilidade dos sistemas de produção. No âmbito da agricultura, o estudo da água precipitável permite aos agricultores planejar o plantio, a colheita e o manejo de culturas, adaptando-se às condições climáticas e garantindo a produtividade. Essas informações auxiliam no manejo eficiente dos sistemas de irrigação, otimizando o uso da água e reduzindo o desperdício. O conhecimento sobre a água precipitável também permite a escolha de culturas mais adequadas às condições climáticas do semiárido, garantindo a produção em condições de escassez hídrica. O estudo da água precipitável estimula o desenvolvimento de tecnologias e práticas agrícolas adaptativas ao semiárido, como o uso de sementes mais resistentes à seca e a otimização de técnicas de manejo do solo.

Para Peixoto e Oort (1992), a água no globo é distribuída em três reservatórios básicos: oceanos, continentes e atmosfera. Ao considerar desta forma,  $1350 \times 10^{15} \text{ m}^3$  de água (cerca de 97% do volume total de água da hidrosfera), estão contidos nos oceanos, enquanto  $33,6 \times 10^{15} \text{ m}^3$  (cerca de 2,4%) se encontram nos continentes, incluindo as regiões glaciais ártica

e antártica. A atmosfera contém  $0,013 \times 10^{15} \text{ m}^3$  ou somente 0,001% do total, percentual este que, embora pequeno, representa um volume em torno de 13 trilhões de metros cúbicos.

O monitoramento da água precipitável é utilizado em diversas áreas, incluindo agricultura, energia, saúde pública e infraestrutura. O estudo da água precipitável tem recebido crescente importância devido à sua relação direta com eventos extremos de clima, como enchentes, secas e furacões. Estes fenômenos estão cada vez mais frequentes e intensos devido às mudanças climáticas (PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS, 2014).

A compreensão da grande irregularidade espaço-temporal da ocorrência de precipitações pluviométricas nas regiões semiáridas é de extrema importância devido ao seu impacto significativo na paisagem ao longo do ano. Esta irregularidade não só influencia a vegetação e a disponibilidade de água, mas também pode modificar drasticamente o ambiente geográfico. A situação dessas regiões já é vulnerável, ressaltando a necessidade de intervenção e gestão adequada. A elevada evapotranspiração, juntamente com a baixa vocação hidrogeológica, aumenta os desafios enfrentados por essas áreas, intensificando a escassez de recursos hídricos e a pressão sobre o meio ambiente. Em vista disso, compreender e abordar essa irregularidade é essencial para garantir a sustentabilidade e a resiliência dessas regiões frente às mudanças climáticas e aos impactos humanos (CAVALCANTI, 2011).

O vapor de água desempenha um papel significativo no aquecimento causado pelas emissões humanas de gases de efeito estufa, contribuindo com parte do efeito. No entanto, prever com precisão a magnitude desse aquecimento, assim como a sensibilidade climática, ainda é um desafio considerável. Os modelos climáticos frequentemente falham em reproduzir com precisão os padrões regionais de distribuição da precipitação, o que implica que eles não capturam adequadamente os processos importantes para regular o clima (BARBOSA, 2014).

Pode-se calcular a concentração de vapor de água por meio da integração vertical da umidade específica, obtendo-se um parâmetro denominado de água precipitável (CABRAL, 2018). A água precipitável é um parâmetro importante que varia no tempo e no espaço com os movimentos atmosféricos. Este vapor d'água se transforma em nuvens e precipitação e, portanto, para análises mais detalhadas é importante considerar o mapeamento mais preciso possível para o risco de inundações, tempestades ou possível período de estiagem (ORGANIZAÇÃO METEOROLÓGICA MUNDIAL, 2015).

O clima de qualquer região é determinado em grande parte pela circulação geral da atmosfera. Essa circulação resulta do aquecimento diferencial do globo pela radiação solar, da distribuição assimétrica de oceanos e padrões de circulação gerados na atmosfera que

redistribuem calor, umidade e *momentum* (quantidade de movimento) por todo o globo. No entanto, essa redistribuição não é homogênea, agindo algumas vezes no sentido de diminuir as variações regionais dos elementos climáticos, tais como, temperatura (MOURA *et al.*, 2019).

O Ceará apresenta uma diversidade climática, influenciada por fatores como latitude, altitude e proximidade com o oceano. Essa diversidade resulta na presença predominante de três tipos de climas distintos: semiárido, tropical úmido e tropical semiúmido. Cada um desses climas possui características específicas em relação à distribuição de chuvas, temperatura e sazonalidade, desempenhando um papel fundamental nas atividades econômicas, na agricultura e na vida cotidiana dos habitantes do estado (NOBRE; MARENGO, 2010).

No semiárido brasileiro, a escassez hídrica exige soluções inovadoras e sustentáveis, como a captação de orvalho (OLIVEIRA, 2007; TARIQ, 2014; SILVA, 2010). A água precipitável está diretamente relacionada à umidade atmosférica, que é a base para a formação de orvalho. Quando a umidade relativa do ar atinge o ponto de saturação, a água em forma de vapor condensa em gotículas, formando o orvalho. Portanto, a água precipitável é um indicador importante do potencial de formação de orvalho em uma região. As pesquisas citadas no texto (KLEMM, 2016; MAKARYNSKYY, 2017; GAO, 2018) exploram diferentes métodos de coleta de orvalho em ambientes semiáridos, buscando otimizar o aproveitamento dessa fonte de água. A localização estratégica dos dispositivos de captação e a escolha criteriosa de materiais (LEE, 2019) são essenciais para maximizar a eficiência da coleta de orvalho, que se torna uma alternativa promissora, especialmente em áreas com baixa água precipitável e altos índices de escassez hídrica. O potencial do orvalho como fonte de água alternativa no semiárido brasileiro é destacado por Nobre (2014), enquanto a viabilidade técnica e econômica do aproveitamento do orvalho, incluindo a obtenção e a captação, é analisada por Lima (2018), ressaltando o potencial do orvalho como alternativa sustentável para o suprimento de água em áreas impactadas pela escassez hídrica.

Nas áreas urbanas, a intensa urbanização impacta o ciclo hidrológico, reduzindo a umidade do ar e, conseqüentemente, a água precipitável (ALLEN *et al.*, 1998). A impermeabilização do solo e a proliferação de construções, juntamente com o efeito "ilha de calor" urbana, alteram a microclimatologia, impactando a água precipitável. O estudo da água precipitável em áreas urbanas é importante para o planejamento de sistemas de drenagem, irrigação, abastecimento e tratamento de água (PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS, 2014). Em áreas rurais, a vegetação desempenha papel fundamental na retenção de umidade e na evaporação, contribuindo para aumentar a água precipitável. A água precipitável é importante para a agricultura, determinando a

disponibilidade de água para as plantações e influenciando o planejamento do plantio, o manejo da irrigação e a escolha de culturas. O estudo da água precipitável em áreas rurais auxilia na gestão de recursos hídricos, na implementação de práticas de manejo do solo e na conservação de nascentes, contribuindo para o desenvolvimento rural sustentável. As áreas urbanas e rurais são interdependentes em termos de recursos hídricos, com a água precipitável em áreas rurais influenciando a disponibilidade de água em áreas urbanas através do escoamento superficial e da recarga de aquíferos. As atividades antrópicas em áreas urbanas podem impactar a água precipitável em áreas rurais adjacentes, afetando o ciclo hidrológico e a disponibilidade de água para a agricultura e outras atividades rurais. A compreensão do papel da água precipitável em ambos os ambientes é crucial para a implementação de políticas públicas que promovam o desenvolvimento sustentável e a segurança hídrica em áreas urbanas e rurais.

Portanto, este trabalho tem como intuito compreender a distribuição espaço-temporal da água precipitável em diferentes regiões climáticas no Estado do Ceará. Para atingir esse propósito, delinear-se os seguintes objetivos específicos: i) analisar as variações sazonais da água precipitável e da umidade específica em distintos contextos climáticos; ii) avaliar o impacto dos fatores meteorológicos na distribuição da água precipitável e da umidade específica e iii) analisar as tendências temporais da água precipitável e da umidade específica em diferentes condições climáticas no Estado do Ceará. Por meio desses objetivos, buscou-se aprofundar a compreensão sobre a dinâmica da água precipitável e seus comportamentos sob diversas influências climáticas, fornecendo conhecimentos valiosos para a gestão e a adaptação às condições climáticas.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

A água precipitável, também conhecida como água atmosférica, desempenha um papel fundamental nos sistemas climáticos e no ciclo hidrológico global. Sua definição refere-se à quantidade total de água contida na atmosfera em forma de vapor de água, incluindo nuvens, névoa e umidade no ar. Este componente essencial da atmosfera desempenha um papel importante em processos meteorológicos, influenciando a formação de nuvens, a ocorrência de precipitação e a regulação do clima. Um dos principais desafios no estudo da água precipitável é a sua medição e quantificação precisa. Métodos tradicionais de medição, como o uso de pluviômetros e estações meteorológicas, têm limitações em capturar a quantidade total de água presente na atmosfera.

### 2.1 Água precipitável

A água precipitável não deve ser considerada como a quantidade de água que pode ser precipitada mediante um processo físico qualquer. Para fins práticos, entretanto, a água precipitável contida na troposfera pode ser considerada como a quantidade do vapor d'água disponível para o processo da precipitação. A variação do vapor d'água na atmosfera depende da transferência da energia térmica existente no ambiente. Quando este vapor é transferido nas duas direções (vertical/horizontal) da atmosfera, é fundamental para manter o equilíbrio da umidade local. A água precipitável existente em uma coluna vertical da atmosfera é, por definição, a massa total de água que seria obtida se todo o vapor d'água da coluna de área unitária se condensasse em um plano horizontal. De um modo mais genérico, a água precipitável representa o armazenamento atmosférico de água sobre uma dada região (CABRAL, 2018).

Yoo, Shin e Yoon (2004) afirma que a água precipitável é o teor de umidade do ar representado pelo vapor contido numa coluna de ar, que é uma informação importante para a análise da interação terra-atmosférica e das mudanças hidrometeorológicas locais. No entanto, a medição exige equipamentos e mão de obra especializada, o que a torna onerosa, apenas informações limitadas estão disponíveis em alguns locais, sendo necessária a sua estimativa indireta em outros locais. A água precipitável apresenta uma sazonalidade óbvia como a precipitação, cuja variabilidade parece ser da mesma ordem do seu valor médio.

A análise de variáveis de umidade, como água precipitável e a dinâmica vertical da umidade, pode contribuir significativamente para a compreensão da definição da estação

chuvosa. Os fluxos de calor sensível e latente são originados pela interação da radiação solar com a superfície, e sua magnitude depende do teor de umidade do ar e do solo, incluindo a água precipitável. O fluxo de calor latente é resultante da ação da radiação solar na evaporação de superfícies úmidas e transpiração das plantas, enquanto o fluxo de calor sensível resulta do aquecimento das superfícies provocadas pela radiação solar. Estes fluxos de calor ocorrem próximos à superfície terrestre e exercem grande influência nos processos atmosféricos de ascensão da parcela de ar, formação de convecção e consequente geração de intensa precipitação (NEVES; ARAÚJO; ARAVÉQUIA, 2013).

Na prevenção das mudanças futuras nas condições de precipitação, a frequência e a intensidade dependem da compreensão dos fatores determinantes, como a coluna de água atmosférica na forma de vapor, isto é, água precipitável, conhecido por ser uma consideração importante na provável precipitação. No entanto, as tendências observadas em eventos de precipitação estão relacionadas a tendências em água precipitável (KUNKEL *et al.*, 2020).

É de vital importância o monitoramento contínuo dos fenômenos atmosféricos, a fim de prever mudanças climáticas, como chuvas torrenciais, e, portanto, reduzir os danos relacionados. No entanto, a radiossondagem nas estações terrestres são limitadas; assim, a instabilidade atmosférica e as variações da água precipitável são monitoradas usando observações de satélite. A água precipitável é usada por meteorologistas para analisar eventos climáticos e prever fortes precipitações. Os meteorologistas normalmente usam uma variedade de dados fontes, desde observações terrestres até previsão numérica do tempo. Eles preferem campos de dados combinados de fontes disponíveis durante um determinado período de tempo para fontes individuais, a fim de analisar fenômenos sinóticos (HEO; RYU; JANG, 2018).

A água precipitável pode ser medida diretamente por meio de instrumentos como radiômetros de micro-ondas, radiômetros ópticos, sondas de umidade e balões meteorológicos. Cada método tem suas próprias fontes de incerteza, incluindo calibração, sensibilidade instrumental, erros de amostragem e representatividade espacial (LEVIZZANI; BAUER; TURK, 2007).

Consoante Almeida, Carvalho e Silva (2018), a variedade de métodos de estimativa da água precipitável gera uma incerteza nesses dados o que impacta a precisão das previsões hidrológicas. A incerteza da água precipitável pode ter um impacto significativo na precisão dos modelos hidrológicos, afetando diretamente as previsões de vazão, a distribuição espacial da precipitação e a disponibilidade de água nas bacias hidrográficas. Isso ressalta a importância de considerar a incerteza dos dados de entrada ao desenvolver e calibrar modelos hidrológicos para regiões brasileiras. As melhorias nos métodos de estimativa da água precipitável,

especialmente em áreas com dados limitados ou escassos, como é comum em muitas regiões do Brasil, destacando-se a importância de integrar dados de diferentes fontes, como satélites, radares meteorológicos e estações meteorológicas, para reduzir a incerteza nas estimativas da água precipitável.

O trabalho de Lima, Santos e Costa (2015) evidência que a incerteza na água precipitável pode ter um impacto significativo na precisão das previsões meteorológicas de curto prazo, especialmente em regiões onde a precipitação é altamente variável, como é comum em muitas áreas do Brasil. A incerteza na água precipitável também pode influenciar as previsões climáticas de longo prazo, afetando a compreensão das tendências climáticas e a formulação de políticas de adaptação às mudanças climáticas. Além disso, a importância de incorporar medidas de incerteza na estimativa da água precipitável nos modelos de previsão do tempo e do clima, a fim de fornecer informações mais confiáveis e úteis para o público em geral, bem como para os tomadores de decisão em diversas áreas, como agricultura, recursos hídricos e gestão de desastres naturais.

Silva e Souza (2018) concluíram que a estimativa da água precipitável utilizando dados de radar meteorológico pode estar sujeita a incertezas significativas, devido a uma série de fatores, como erros de calibração do radar, atenuação do sinal e variabilidade espacial da precipitação. É importante a avaliação da incerteza na estimativa da água precipitável para garantir a confiabilidade das informações fornecidas pelos sistemas de radar meteorológico, especialmente em regiões onde a precipitação é altamente variável e as condições atmosféricas são complexas. Existe uma complexidade de várias fontes de incerteza associadas à estimativa da água precipitável.

## **2.2 Atmosfera terrestre e troposfera**

A atmosfera do planeta Terra costuma ser dividida verticalmente em camadas concêntricas, definidas por suas características de temperatura e pressão, subdividindo-se em cinco camadas de gases que contornam o planeta: troposfera, estratosfera, mesosfera, termosfera e exosfera. Sua composição é composta basicamente de uma mistura de gases, sendo 78% de nitrogênio, 21% de oxigênio e 1% de argônio. Além disso, são encontrados traços de gás carbônico, vapor d'água e outros gases, mas em quantidades bem pequenas.

A atmosfera terrestre é a camada composta por radiação, gases e material particulado (aerossóis) que envolve a terra e se estende por centenas de quilômetros. Os limites

inferiores da atmosfera são, obviamente, as superfícies da crosta terrestre e dos oceanos. Contudo, os seus limites superiores não são bem definidos porque, com o aumento da altitude, a atmosfera vai se tornando cada vez mais tênue, em relação ao seu conteúdo de matéria, até que ela se confunda com o meio interplanetário. Para fornecer uma perspectiva elucidativa de quão rarefeita materialmente a atmosfera se torna à medida que se afasta da superfície terrestre, basta saber que 99% de sua massa está contida numa camada de aproximadamente 32 km (DIAS; ANDRADE-NETO; MILITÃO, 2007).

A atmosfera é essencial para a vida e o funcionamento ordenado dos processos físicos e biológicos sobre a terra. A atmosfera protege os organismos da exposição a níveis arriscados de radiação ultravioleta, contém os gases necessários para os processos vitais de respiração celular e fotossíntese, além de fornece água necessária para a vida. A composição do ar não é constante nem no tempo, nem no espaço. O dióxido de carbono, o vapor d'água, o ozônio e os aerossóis ocorrem em pequenas concentrações, mas são importantes para os fenômenos meteorológicos ou para a vida (RIZZO, 2006).

A troposfera é a camada mais próxima da crosta terrestre. Nela, encontra-se o ar usado na respiração de plantas e animais. Ela é composta, basicamente, pelos mesmos elementos encontrados em toda a atmosfera, nitrogênio, oxigênio e gás carbônico. Quase todo o vapor encontrado na atmosfera situa-se na troposfera, que ocupa 75% da massa atmosférica. A distância em relação à superfície chega até dezessete quilômetros em relação ao Equador e até dez quilômetros em relação aos polos. Ele também contém 99% do vapor d'água da atmosfera (MOHANAKUMAR, 2008).

De acordo com a explicação de Rizzo (2006) a troposfera é a camada atmosférica que se estende desde a superfície terrestre até cerca de 11 km de altitude. Sua principal característica consiste na diminuição da temperatura em função da altitude, conhecida como taxa de lapso adiabático, é de cerca de 6,5 °C/km, porém essa taxa não é constante e varia com a umidade do ar e a pressão atmosférica, desconsiderando possíveis inversões térmicas na camada mais próxima à superfície. Somente a parte mais baixa da troposfera (~1,5 km de altitude) é diretamente influenciada pela superfície terrestre, sendo denominada Camada Limite Planetária (CLP). No interior dessa camada ocorrem movimentos turbulentos cujo grau de intensidade é determinado por fatores térmicos (temperatura da superfície e fluxo de calor a partir do solo) e mecânicos (rugosidade e velocidade do vento na superfície). A estrutura e a altura do topo da CLP sofrem variações ao longo do dia e durante a noite, o ar é resfriado devido à perda de radiação de onda longa pelo solo, levando à formação de uma camada estável denominada Camada Noturna (CN). Esta camada geralmente apresenta baixos níveis de turbulência,

causando o aumento da concentração de gases e partículas pela redução volumétrica de ar. Acima da camada noturna localiza-se a Camada Residual (CR), remanescente da camada de mistura do dia anterior. Com o nascer do sol, ocorre o aquecimento da superfície, gerando vórtices turbulentos que provocam uma gradual mistura entre a camada noturna e a camada residual. A altura da camada limite cresce, e conseqüentemente, ocorre uma progressiva diluição na concentração de gases e partículas armazenadas na camada noturna.

Segundo Sherwood, Bony e Dufresne (2014), a troposfera sobre a linha do equador é notavelmente mais espessa, alcançando alturas de cerca de 16 a 18 quilômetros devido ao intenso aquecimento solar. Essa região é caracterizada por uma alta instabilidade atmosférica que resulta em movimentações dinâmicas. As correntes ascendentes de ar quente são frequentes, favorecendo a formação de nuvens e intensa precipitação pluviométrica, típica do clima equatorial.

### **2.3 Umidade específica**

A umidade específica na atmosfera é uma medida fundamental que descreve a quantidade de vapor d'água presente em uma determinada massa de ar. Sua distribuição e variação influenciam diretamente os padrões climáticos e meteorológicos em escalas locais, regionais e globais.

Holton (2004) define a umidade específica como sendo a massa de vapor d'água presente em uma unidade de massa de ar. Sua importância reside no papel fundamental que desempenha nos processos atmosféricos, incluindo a formação de nuvens, precipitação, evaporação e regulação do clima.

A umidade específica pode ser medida diretamente por instrumentos como o higrômetro de cabelo, higrômetro de filme de polímero e sondas de umidade em balões meteorológicos. Além disso, métodos indiretos, como o uso de radiossondas e satélites meteorológicos, também são empregados para estimar a umidade específica em diferentes altitudes e locais (PETERSEN; RENNO, 2005).

Estudos mostram que a umidade específica da atmosfera varia verticalmente, com valores geralmente diminuindo com a altitude. Observações de radiossondas e satélites revelam perfis de umidade específica que são influenciados por fatores como temperatura, pressão atmosférica e padrões de circulação atmosférica (TRENBERTH; FASULLO; SMITH, 2005).

A umidade específica da atmosfera exhibe variações temporais e espaciais significativas. Essas variações estão relacionadas a diferentes fenômenos meteorológicos, como

frentes atmosféricas, sistemas convectivos, massas de ar e circulações atmosféricas de larga escala, como *El Niño* e *La Niña* (STULL, 2017).

A distribuição e variação da umidade específica desempenham relevância na regulação do balanço de energia da terra e na formação de padrões climáticos. Mudanças na umidade específica podem afetar a frequência e intensidade de eventos meteorológicos extremos, como secas, inundações, tempestades e furacões (PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS, 2014).

A umidade ambiental é um termo geral para descrever a presença de vapor de água no ar, podendo ser descrita quantitativamente de várias formas, tais como: Razão de mistura, que corresponde à razão entre a massa de vapor de água e a massa de ar seco; umidade específica, que corresponde à razão entre a massa de vapor de água e a massa da mistura de ar (mistura de ar seco e vapor de água) (VILARINHO, 2009).

A umidade específica é a concentração de vapor d'água expressa como a massa de vapor d'água por unidade de massa de ar, que indica a quantidade de umidade atmosférica que influencia as condições da superfície e pode explicar o efeito básico da temperatura na umidade do solo. Existe uma estreita relação entre a disponibilidade de umidade na superfície (umidade do solo) e na atmosfera (umidade específica), que são componentes do equilíbrio de umidade. A umidade específica pode ser facilmente calculada com temperatura média, umidade relativa e pressão local, que são dados meteorológicos medidos mais comumente e amplamente usados (SAHIN, 2012).

## **2.4 Pressão atmosférica**

A pressão atmosférica é uma medida da força exercida pela atmosfera da terra sobre uma determinada área. Sua compreensão é fundamental para muitos aspectos da meteorologia, ciências atmosféricas e física em geral. A pressão atmosférica é definida como a força exercida pela massa de ar sobre uma unidade de área na superfície terrestre. Ela é causada pela gravidade da terra, que atrai as moléculas de ar em direção ao solo (HOLTON, 2004).

A pressão atmosférica é comumente medida em unidades de milibares (mb) ou hectopascal (hPa). Instrumentos como o barômetro são utilizados para medir diretamente a pressão atmosférica ao nível do solo. Além disso, radiossondas e satélites meteorológicos são empregados para medir a pressão em diferentes altitudes na atmosfera (WALLACE; HOBBS, 2006).

A pressão atmosférica diminui com a altitude, seguindo um perfil exponencial. Esse

padrão de diminuição é influenciado pela densidade do ar, temperatura e variações na composição atmosférica. A pressão atmosférica também varia horizontalmente devido a diferentes condições meteorológicas e geográficas (TRENBERTH; FASULLO; SMITH, 2005).

A pressão atmosférica exibe variações temporais e espaciais significativas. Essas variações estão relacionadas a fenômenos atmosféricos, tais como: frentes meteorológicas, sistemas de alta e baixa pressão, circulações atmosféricas de larga escala, como El Niño e La Niña e padrões climáticos regionais e globais (STULL, 2017).

A pressão atmosférica é importante na formação de padrões climáticos, sistemas meteorológicos e na regulação do clima da terra. Mudanças na pressão atmosférica podem influenciar a direção e intensidade dos ventos, a formação de nuvens, a distribuição de temperatura e a ocorrência de eventos meteorológicos extremos (PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS, 2014). A água precipitável possui uma relação direta com a pressão atmosférica, sendo influenciada indiretamente por fatores como temperatura, umidade e pressão atmosférica (HARRISON, 1995).

## **2.5 Densidade do ar**

O estudo de García, Sánchez-Sesma e Ramos-Martínez (2003) investigou como a densidade do ar abrange uma variedade de tópicos e aplicações, na meteorologia e climatologia, desempenhando importante papel na formação de padrões climáticos, circulação atmosférica e fenômenos meteorológicos extremos. Estudos têm explorado como variações na densidade do ar podem influenciar a formação de nuvens, a ocorrência de tempestades e até mesmo a qualidade do ar.

As variações na densidade do ar podem influenciar uma série de parâmetros meteorológicos. Destaca-se que a densidade do ar é afetada por fatores como temperatura, pressão atmosférica e umidade, e que essas variações têm consequências significativas para o clima e o tempo atmosférico. As mudanças na densidade do ar podem afetar a formação de nuvens, a intensidade da radiação solar, a velocidade do vento e outros aspectos do sistema climático (LEANDRO; SILVA, 2007).

Silva, Oliveira e Silva (2013) destacaram a importância de considerar a densidade do ar como um fator influente nos processos meteorológicos no nordeste brasileiro, especialmente em áreas onde a precipitação é sensível a variações na composição atmosférica.

As variações na densidade do ar afetam a formação de sistemas atmosféricos, como a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que é relevante na distribuição da precipitação na região. As mudanças na densidade do ar podem influenciar a intensidade e frequência de eventos extremos de precipitação, como secas e chuvas intensas, que são comuns no nordeste brasileiro. Os estudos referentes a densidade do ar, são fundamentais para entender os impactos das mudanças climáticas na região e para desenvolver estratégias de adaptação e mitigação.

Silva, Freitas e Campos (2015), salientam a importância de entender como as condições atmosféricas, incluindo a densidade do ar, influenciam a formação e evolução de nuvens, que são essenciais na distribuição de precipitação na região. Estudos subsequentes têm investigado como variações na densidade do ar estão relacionadas com mudanças na distribuição espacial e temporal de nuvens convectivas, bem como sua intensidade e duração. Os mecanismos físicos pelos quais a densidade do ar influencia a formação de nuvens convectivas, incluindo sua capacidade de transportar umidade e calor na atmosfera. Os estudos sobre a densidade do ar são fundamentais para melhorar a compreensão dos processos atmosféricos na região semiárida do nordeste brasileiro e para desenvolver modelos mais precisos de previsão do tempo.

É relevante entender como as condições atmosféricas locais, incluindo a densidade do ar, influenciam a concentração e distribuição de poluentes na atmosfera, afetando assim a qualidade do ar e a saúde humana. Estudos têm investigado como variações na densidade do ar estão relacionadas com padrões de circulação atmosférica local e regional, que por sua vez influenciam a dispersão e transporte de poluentes. Estudos sobre os efeitos das condições meteorológicas, como temperatura, umidade e velocidade do vento, na dispersão de poluentes atmosféricos, são fundamentais para compreender os fatores que contribuem para a poluição do ar e para desenvolver estratégias eficazes de mitigação e controle da qualidade do ar na região. A densidade do ar também pode afetar a formação e dispersão de aerossóis e partículas suspensas na atmosfera, que podem contribuir para problemas de saúde respiratória e reduzir a visibilidade (SANTOS; RODRIGUES; COSTA, 2018).

## **2.6 Gravidade terrestre**

A gravidade terrestre é a força atrativa que todos os objetos com massa exercem uns sobre os outros. Ela é responsável por manter os objetos na superfície da terra e determina a aceleração dos corpos em queda livre. A Lei da Gravitação Universal de Newton descreve essa interação, indicando que a força gravitacional entre dois corpos é diretamente proporcional às

suas massas e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre eles (SERWAY; JEWETT, 2014).

A gravidade terrestre é medida usando instrumentos chamados gravímetros. Esses dispositivos detectam as pequenas variações na força gravitacional da Terra, permitindo o mapeamento da distribuição da gravidade sobre a superfície terrestre. Diferentes métodos, como gravimetria absoluta e relativa, são utilizados para medir a gravidade em diferentes locais e altitudes (TORGE, 1989).

A gravidade terrestre não é uniforme e varia em diferentes partes do mundo devido a fatores como altitude, densidade da crosta terrestre e distribuição de massas. Essas variações são mapeadas por satélites gravitacionais, como o *Gravity Recovery and Climate Experiment* (GRACE), que fornece dados detalhados sobre a distribuição da massa da terra e as mudanças na gravidade ao longo do tempo (TAPLEY *et al.*, 2004).

A gravidade terrestre tem uma ampla gama de aplicações em geofísica, geologia, geodésia, oceanografia, exploração de recursos naturais, aviação e até mesmo em estudos climáticos. Ela é usada para mapear a estrutura interna da terra, monitorar movimentos tectônicos, calcular a topografia oceânica, determinar a densidade da crosta terrestre e até mesmo prever mudanças climáticas (FORSBERG; TSCHERNING, 2018).

Variações temporais na gravidade terrestre podem ser causadas por fatores como a redistribuição de massas de gelo, mudanças no nível do mar e atividades tectônicas causando implicações significativas para os estudos climáticos, uma vez que podem influenciar o equilíbrio de massa na terra e afetar o nível médio do mar (TAMISIEA *et al.*, 2010).

Em Li, Ying e Potter (2001) os efeitos da umidade específica na formação de chuva revelam que elevados níveis desse parâmetro estão frequentemente correlacionados com a geração de nuvens e, conseqüentemente, com os processos de precipitação. O transporte de umidade na atmosfera está intimamente ligado à distribuição e intensidade da precipitação. Embora a relação entre umidade específica e precipitação não seja linear, a presença de umidade atmosférica é uma condição necessária para o desenvolvimento de sistemas meteorológicos que resultam em chuva.

## **2.7 Vapor de água na atmosfera**

O vapor d'água desempenha papel fundamental nos processos físicos que ocorrem

na atmosfera, por exemplo, nos processos de transferência de radiação na atmosfera e no transporte e liberação de calor latente. Para o sistema climático global, o vapor d'água é essencial por afetar diretamente o balanço de energia da superfície terrestre por meio dos fluxos radiativos e da formação de nuvens, além de estabelecer uma ligação entre a superfície do planeta e a atmosfera. Essa ligação é feita através de um ciclo hidrológico que envolve um importante processo de realimentação, pois, à medida que aumenta a temperatura da atmosfera, mais vapor d'água pode ser armazenado (FREITAS *et al.*, 2019).

O transporte do vapor d'água na atmosfera representa um dos fatores determinantes do clima global. O vapor d'água é transportado horizontalmente e verticalmente pela circulação atmosférica. Grande quantidade de vapor na atmosfera é carregada das áreas oceânicas (onde há intensa evaporação) para os continentes, onde vem a precipitar. A energia em movimento devido ao movimento do vapor na atmosfera, está na forma de calor latente. Quando ocorre a condensação, o calor latente é convertido em calor sensível o qual se constitui numa importante fonte de aquecimento atmosférico relacionada aos sistemas de circulação que estão associados, por sua vez, ao tempo e ao clima. O vapor d'água representa, ainda, o principal componente do ar, no efeito estufa, “bloqueando” a passagem de parte da radiação de onda longa proveniente do aquecimento da superfície da terra. O vapor d'água não se distribui uniformemente sobre a terra. Ele se concentra mais fortemente próximo do Equador escasseando em direção aos polos, de acordo com os padrões de temperatura dessas regiões (TEIXEIRA, 2003).

Solomon (2000) destaca o vapor de água como um dos principais gases de efeito estufa na atmosfera terrestre sendo essenciais no balanço energético do planeta. O vapor de água absorve a radiação infravermelha emitida pela superfície terrestre e pelas nuvens, contribuindo para o aquecimento da atmosfera. Esse processo, conhecido como efeito estufa, é fundamental para manter a temperatura média da terra em níveis compatíveis com a vida. Aumentos na temperatura global podem levar a um aumento na evaporação da água, aumentando assim a concentração de vapor de água na atmosfera, aumentando na sua concentração e conseqüentemente ocasionando o aquecimento global. Mudanças na distribuição e na quantidade de vapor de água na atmosfera podem afetar a formação e a dissipação de nuvens, influenciando assim o clima.

A compreensão do vapor de água, de sua distribuição, transporte e interações é fundamental para prever o clima, entender os padrões climáticos regionais e globais e estudar as mudanças climáticas. Wallace e Hobbs (2006) discutem como a quantidade de vapor de água diminui com a altitude, atingindo seu máximo na superfície terrestre e diminuindo rapidamente conforme se move para cima na troposfera. Além disso, salientam que a distribuição horizontal

do vapor de água, destacando como ela varia com a latitude, temporada e localização geográfica.

Wallace e Hobbs (2006) dizem que o vapor de água é evaporado dos oceanos, transportado pela atmosfera, condensa-se para formar nuvens e precipita-se como chuva ou neve, antes de retornar aos oceanos, rios e lagos. O vapor de água é transportado pela atmosfera através de processos como advecção horizontal e vertical, destacando a importância dos ventos e das correntes atmosféricas na redistribuição global do vapor de água.

## **2.8 Precipitação**

A precipitação é um componente essencial do sistema climático e é fundamental para os padrões climáticos globais, nos ciclos hidrológicos e na distribuição de água doce em todo o mundo. Uma compreensão abrangente dos processos que influenciam a precipitação é fundamental para prever eventos climáticos extremos, gerenciar recursos hídricos e entender os impactos das mudanças climáticas.

Trenberth *et al.*, (2003) discute as mudanças na característica da precipitação em resposta às mudanças climáticas, enfatizando a necessidade de monitoramento contínuo e pesquisa para entender e adaptar-se aos padrões de precipitação em evolução.

As projeções feitas no estudo de Chou *et al.*, (2012) sugerem alterações importantes no regime de precipitação ao longo do século XXI. Essas mudanças incluem uma possível intensificação do ciclo hidrológico, com aumento na frequência e intensidade de eventos de precipitação em algumas áreas, bem como uma prolongada estação seca em outras regiões.

A compreensão das características meteorológicas e dos processos atmosféricos por trás dos extremos de precipitação é importante para avaliar os impactos socioeconômicos e os riscos associados a eventos climáticos extremos, como inundações e deslizamentos de terra (RODRIGUEZ *et al.*, 2009).

A grande extensão latitudinal e as variadas formas de relevo da América do Sul permitem o desenvolvimento e a atuação de diferentes sistemas atmosféricos, que contribuem para a existência da precipitação ao longo do continente. As características de cada regime (ciclo anual de precipitação e sistemas atmosféricos que contribuem e/ou inibem a precipitação), considerando-se a baixa e alta troposfera (REBOITA *et al.*, 2010).

### **2.8.1 Precipitação no nordeste brasileiro**

O trabalho de Marengo e Alves (2005) evidencia que a região semiárida do nordeste do Brasil é caracterizada por uma variabilidade climática significativa, com chuvas escassas e irregularmente distribuídas, o que torna a região suscetível a secas e eventos extremos. Observa-se uma tendência de redução na precipitação média em algumas áreas do semiárido nordestino, enquanto outras áreas apresentaram aumentos significativos na precipitação e eventos extremos. É relevante entender os padrões de variabilidade da precipitação no nordeste brasileiro, especialmente em um contexto de mudanças climáticas globais. Essas mudanças têm implicações significativas para a agricultura, os recursos hídricos e o desenvolvimento sustentável da região, exigindo a implementação de estratégias de adaptação e mitigação adequadas.

O Dipolo do Atlântico é o fenômeno oceano/atmosférico identificado como uma mudança anômala na temperatura da superfície da água do mar no Oceano Atlântico Tropical, ou seja, quando as águas do Atlântico Tropical Norte estão mais quentes e as águas do Atlântico Equatorial e Tropical Sul estão mais frias existem movimentos descendentes transportando o ar frio e seco dos altos níveis da atmosfera sobre a região setentrional, central e sertão do nordeste inibindo a formação de nuvens e diminuindo a precipitação (Fase Positiva do Dipolo), podendo causar secas. Por outro lado, quando as águas do Atlântico Tropical Norte estão mais frias e as águas do Atlântico Tropical Sul estão mais quentes existem aumento nos movimentos ascendentes sobre estas regiões, intensificando a formação de nuvens e aumentando os índices pluviométricos (Fase Negativa do Dipolo) (HASTENRATH; HELLER, 1977; MOURA; SHUKLA, 1981; ARAGÃO, 1998).

O padrão de anomalias de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) possibilita a ocorrência de gradientes meridionais de anomalias de TSM, os quais influenciam bastante na posição latitudinal da ZCIT, alterando assim a distribuição sazonal de precipitação pluviométrica sobre o Atlântico Equatorial, parte norte do nordeste do Brasil, até a parte central da Amazônia (NOBRE; SHUKLA, 1996). Nos anos em que as TSM sobre o Atlântico Tropical Sul (entre a linha do Equador e 15°S) estão mais altas do que a média de longo período durante Março-Abril-Maio (MAM) e o Atlântico Tropical Norte (entre 5°N e 20°N) está menos aquecido do que a média, há formação de um gradiente meridional de anomalias de TSM no sentido de norte-sul. Nessa situação observa-se no mesmo período uma Pressão ao Nível do Mar (PNM) mais baixa do que a média sobre o Atlântico Sul e mais alta do que a média sobre o Atlântico Norte, os alísios de sudeste mais fracos do que a média e os alísios de nordeste mais intensos do que a média, o eixo de baixa pressão à superfície e confluência dos ventos alísios deslocados mais para sul, relativamente ao seu posicionamento médio, e totais pluviométricos

acima da média sobre o norte do nordeste (HASTENRATH; HELLER, 1977).

Santos e Nobre (2020), salientam a tendência de aumento na frequência e intensidade de eventos climáticos extremos no nordeste do Brasil nas últimas décadas. Essas mudanças estão associadas a uma série de fatores, incluindo o aumento da temperatura da superfície do mar, mudanças na circulação atmosférica e variações nos padrões de precipitação. Acredita-se numa conexão entre os extremos climáticos no nordeste brasileiro e padrões de circulação atmosférica em larga escala, como o *El Niño*-Oscilação Sul (ENOS), a Oscilação *Madden-Julian* (MJO) e outros modos de variabilidade climática.

### 2.8.2 Orvalho

A coleta de orvalho tem sido uma prática conhecida, oferecendo uma fonte de água potencialmente valiosa em regiões áridas e semiáridas. O processo de formação do orvalho envolve a condensação da umidade atmosférica em superfícies frias durante a noite, resultando na formação de gotículas de água. Beysens *et al.*, (1995) discutem os fatores que influenciam a quantidade de orvalho coletado, incluindo temperatura, umidade relativa, velocidade do vento e características das superfícies de coleta. A coleta de orvalho tem o potencial de fornecer uma fonte de água alternativa em regiões onde a água potável é escassa. Os autores ainda destacam a importância de investigações contínuas neste campo para otimizar a tecnologia e promover sua adoção em comunidades vulneráveis.

A formação do orvalho ocorre quando a superfície resfria abaixo do ponto de orvalho, levando à condensação do vapor de água presente no ar em forma de pequenas gotículas. A temperatura é um dos principais fatores que afetam a formação do orvalho. Quando a temperatura da superfície cai abaixo do ponto de orvalho, o vapor de água no ar se condensa na superfície, formando gotículas de orvalho (ABIODUN; SALAMI; BELLO, 2010). O orvalho pode ter impactos significativos na agricultura e nos ecossistemas, fornecendo uma fonte adicional de umidade para as plantas durante períodos de seca. Existem várias técnicas para medir e monitorar a formação de orvalho, incluindo estações meteorológicas automáticas equipadas com sensores de temperatura e umidade. Esses dados são essenciais para entender os padrões de formação de orvalho e seus efeitos em diferentes regiões.

A formação do orvalho exhibe variações diárias e sazonais, dependendo das condições meteorológicas e características ambientais locais. Estudos como o de Antunes e Pereira (2007) analisam essas variações para entender os padrões de formação do orvalho e sua influência nos ecossistemas. O monitoramento contínuo do orvalho e sua inclusão em modelos

climáticos e de previsão do tempo são essenciais para compreender seus padrões de ocorrência e seu papel nos sistemas naturais. Esses dados são úteis para prever a disponibilidade de água, otimizar práticas agrícolas e gerenciar recursos hídricos em regiões secas.

No estudo de Coutinho e Stegani (2018) destaca as variações do orvalho em diferentes ambientes, o que pode incluir áreas urbanas, rurais, florestais, entre outras. Essas variações podem ser observadas ao longo do dia e ao longo do ano, dependendo das condições climáticas locais e sazonais. O estudo do orvalho tem várias aplicações práticas em diferentes setores, incluindo agricultura, previsão do tempo, energia eólica e manejo de recursos hídricos. Compreender os padrões de formação do orvalho é essencial para otimizar práticas e tomadas de decisão nessas áreas.

Tabela 1 – Orvalho médio mundial por clima

<b>Local</b>	<b>Clima</b>	<b>Orvalho médio (mm/dia)</b>	<b>Referência</b>
Castelo Dale (Estados Unidos)	<b>Semiárido</b>	<b>0,091</b>	<b>Malek <i>et al.</i>, (1999)</b>
Negev - Terras Altas	<b>Árido</b>	<b>0,139 - 0,288</b>	<b>Kidron (2000)</b>
Nizzana (Israel)	<b>Desértico</b>	<b>0,100 - 0,312</b>	<b>Jacobs (2000)</b>
Gaolan (China)	<b>Semiárido</b>	<b>0,07</b>	<b>Li (2002)</b>
Países Baixos	<b>Desértico</b>	<b>0,101</b>	<b>Jacobs <i>et al.</i>, (2006)</b>
Guangzhou (China)	<b>Semiárido</b>	<b>0,012 - 0,034</b>	<b>Ye <i>et al.</i>, (2007)</b>
Rambla Honda (Espanha)	<b>Semiárido</b>	<b>0,072</b>	<b>Moro <i>et al.</i>, (2007)</b>
Hunshandak Sandlana (Mongolia)	<b>Semiárido</b>	<b>0,120 - 0,240</b>	<b>Wang <i>et al.</i>, (2017)</b>
Taklimakan (China)	<b>Hiperárido</b>	<b>0,12</b>	<b>Hao <i>et al.</i>, (2012)</b>
Badain Jaran (China)	<b>Desértico</b>	<b>0,13</b>	<b>Zhuang <i>et al.</i>, (2017)</b>

Fonte: Adaptado Zhang *et al.*, (2015) e Sousa (2020)

Analisando-se a Tabela 1 verifica-se que os locais indicados, exibem uma ampla diversidade em termos de sua localização geográfica e clima, abrangendo desde áreas semiáridas até hiperáridas. Essa diversidade é refletida na variação significativa do orvalho médio entre os locais listados, com valores variando de 0,072 mm/dia em Rambla Honda, Espanha, a 0,31 mm/dia em Badain Jaran, China. Essa variação indica que fatores como temperatura, umidade relativa do ar e vegetação local desempenham um papel importante na formação do orvalho em diferentes regiões. Os dados selecionados baseiam-se em uma série de estudos científicos realizados ao longo do tempo, evidenciando uma variedade de fontes utilizadas na coleta dessas informações. Regiões classificadas como hiperáridas, como Taklimakan na China, ainda demonstram algum nível de orvalho, mesmo que em quantidades mínimas (0,12 mm/dia), destacando a complexidade do fenômeno e sua persistência em

condições extremamente áridas.

### **2.8.3 A influência dos ventos na composição da água atmosférica**

Em estudos anteriores, Ma *et al.*, (2020), demonstraram que os ventos têm papel fundamental na distribuição espacial e temporal das chuvas e na composição isotópica das águas atmosféricas. Outros estudos, como o de Zhang, Zhang, Xu (2018), examinaram a influência dos ventos na variação espacial das chuvas e nas assinaturas isotópicas em áreas montanhosas, sugerindo que os padrões de vento podem modular a distribuição das chuvas e as características das assinaturas isotópicas. Ma *et al.*, (2020), evidenciam a intrincada dinâmica das interações entre os ventos e a composição das águas atmosféricas, indicando que fatores como topografia, circulação atmosférica e características locais podem modular os efeitos dos ventos na precipitação e nas propriedades isotópicas das águas atmosféricas.

No estudo de Saylor *et al.*, (2018), os autores identificaram os controles dominantes sobre a composição isotópica da precipitação, incluindo a influência das massas de ar, padrões de circulação atmosférica e transporte de umidade. Ressaltam a importância dos ventos na modulação da composição das águas atmosféricas em regiões montanhosas e destacam a necessidade de considerar os padrões de vento ao interpretar as variações na composição isotópica da precipitação.

Wainwright e Lai (2018) ressaltaram a importância dos padrões de vento na distribuição espacial e temporal das chuvas e na composição isotópica das águas atmosféricas. Os autores analisaram os controles sinóticos sobre os isótopos da precipitação, destacando a influência dos sistemas meteorológicos regionais, como frentes atmosféricas e sistemas convectivos, na composição das águas atmosféricas. Esses resultados indicam que os ventos desempenham um papel fundamental na modulação da composição isotópica da precipitação e na distribuição espacial das chuvas.

No estudo de Mendes e Carvalho (2019), os autores avaliaram a sensibilidade da precipitação no Brasil à intensidade dos ventos de oeste, destacando a influência desses ventos na distribuição espacial e temporal das chuvas. Os resultados sugerem que variações na intensidade dos ventos de oeste podem afetar significativamente os padrões de precipitação em diferentes regiões do Brasil, indicando a importância dos ventos como um dos principais controladores da composição da água atmosférica.

Em seu estudo, Amorim, Souza e Vila (2017) examinaram o impacto do vento em superfície na distribuição da precipitação. Os resultados indicam que a direção e a intensidade

do vento podem influenciar significativamente a distribuição espacial das chuvas, o que por sua vez pode afetar a composição da água atmosférica.

## **2.9 Evapotranspiração**

A Evapotranspiração (ET) é um processo fundamental no ciclo hidrológico, representando a perda de água da superfície do solo para a atmosfera através da evaporação direta e da transpiração das plantas. A evapotranspiração é um processo chave no ciclo hidrológico, influenciando diretamente a disponibilidade de água nas plantas, no solo e na atmosfera. Estimar a evapotranspiração com precisão é fundamental para uma variedade de aplicações, incluindo gestão de recursos hídricos, agricultura e previsão do tempo (SINGH; SENAY; VELPURI, 2019).

A estimativa adequada da evapotranspiração da cultura (ETC) consiste no principal parâmetro a ser considerado no dimensionamento e manejo de sistemas de irrigação, uma vez que totaliza a quantidade de água utilizada nos processos de evaporação e transpiração pela cultura durante determinado período (CUNHA; MAGALHÃES; CASTRO, 2013).

Shuttleworth (2012) descrever os princípios físicos que governam a evapotranspiração, incluindo a transferência de massa de água do solo e da vegetação para a atmosfera por meio de processos de evaporação e transpiração das plantas. Ele discute como fatores como temperatura, umidade, vento e radiação solar influenciam esses processos, fornecendo uma base sólida para entender as variações na evapotranspiração em diferentes condições ambientais. As implicações da evapotranspiração na gestão de recursos hídricos, destacando sua importância na determinação do uso eficiente da água na agricultura, previsão de secas e inundações e monitoramento de mudanças climáticas e de uso da terra. O autor ressalta a necessidade de considerar a evapotranspiração em modelos hidrológicos e sistemas de gerenciamento de recursos hídricos para uma gestão sustentável dos recursos hídricos.

## **3 METODOLOGIA**

### **3.1 Área de estudo e base de dados hidroclimáticos**

O estado do Ceará, situado na região nordeste do Brasil (Figura 1), apresenta uma

mescla única de elementos geográficos e climáticos que exercem influência marcante sobre sua paisagem e ecossistemas. Com uma extensão territorial de 148.920 km<sup>2</sup>, o Ceará compartilha fronteiras com os estados do Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Piauí, além de ser banhado pelo Oceano Atlântico. A geografia do estado é notavelmente diversificada, abrangendo desde planícies costeiras até serras, chapadas e áreas semiáridas. Destaca-se a Chapada do Araripe, localizada ao sul, reconhecida como uma das formações geológicas mais proeminentes do Ceará. Quanto ao clima, predomina o tropical semiárido, caracterizado por chuvas escassas e irregulares ao longo do ano. Apesar disso, existem variações climáticas significativas entre diferentes regiões do estado. Durante a estação chuvosa, tipicamente de fevereiro a maio, algumas áreas do Ceará recebem precipitações intensas, enquanto outras permanecem áridas, evidenciando a notória irregularidade pluviométrica da região. O Ceará, com seu clima semiárido, é marcado por uma estação chuvosa, de março a junho, com pico em abril e maio, e uma estação seca, de julho a fevereiro, com pico em setembro e outubro. As chuvas concentradas na estação chuvosa, influenciadas pela ZCiT e sistemas frontais, são essenciais para o abastecimento de água e a agricultura. Já a estação seca, com baixa umidade, altas temperaturas e ausência de chuvas, representa um período crítico para o estado, com risco de estiagem e escassez hídrica. A variabilidade das chuvas, influenciada pelo fenômeno *El Niño*-Oscilação Sul (ENSO) e por variações interanuais, exige um gerenciamento estratégico de recursos hídricos e a adaptação às mudanças climáticas, garantindo a segurança hídrica e o desenvolvimento sustentável da região (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2021).

Figura 1 – Localização da área de estudo (Estado do Ceará)



Fonte: (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2011; SUPERINTENDÊNCIA DO DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE, 2024)

A pesquisa utilizou dados meteorológicos diários de 17 estações da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), abrangendo 17 municípios do Ceará, coletados entre 2003 e 2022. Esses dados, que englobam informações sobre precipitação, pressão atmosférica, temperatura (média, mínima e máxima), temperatura do ponto de orvalho, umidade relativa do ar e velocidade do vento, foram escolhidos por representarem o maior conjunto de informações contínuas e confiáveis para o período de estudo. A intenção inicial era cobrir pelo menos 10% dos municípios cearenses, buscando uma representatividade espacial adequada. No entanto, a análise da disponibilidade de dados e a necessidade de um conjunto de informações robusto e contínuo, levou à seleção dessas 17 estações que ofereciam o maior volume de dados consistentes.

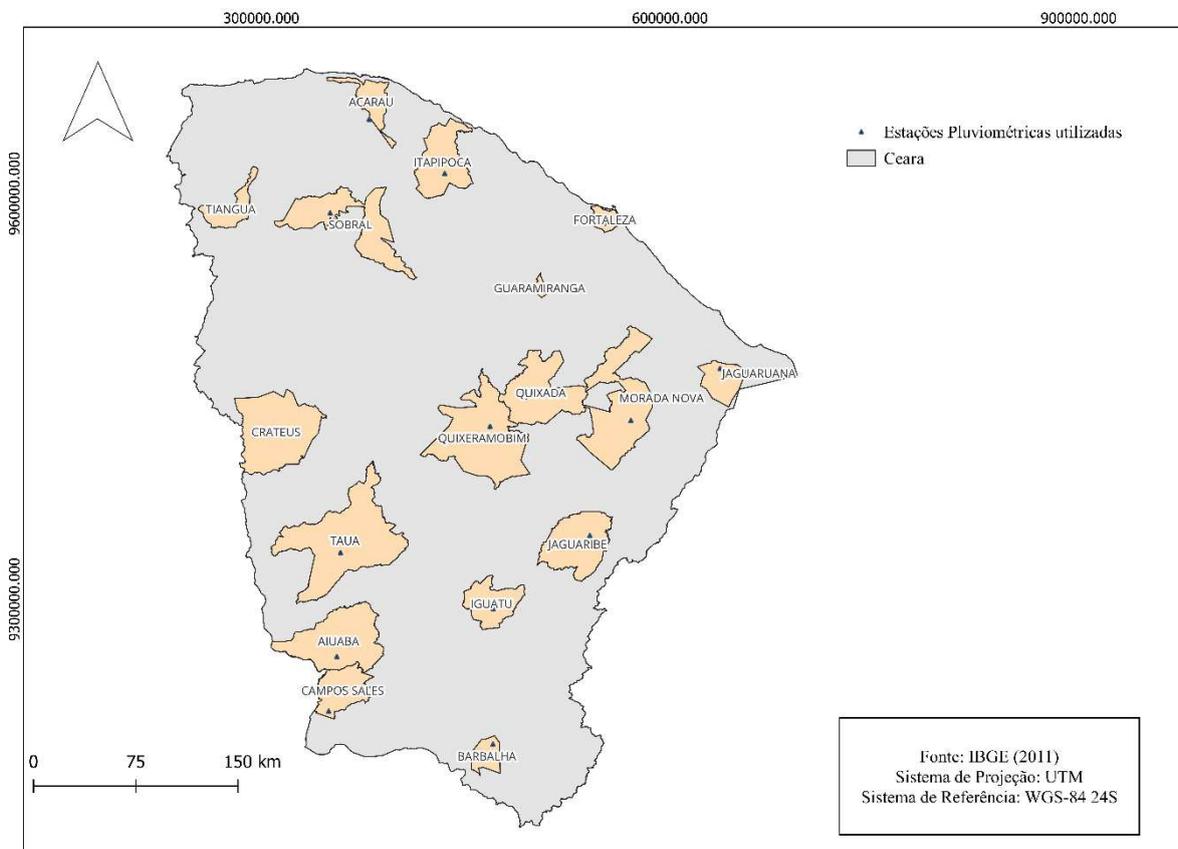
A análise se baseou em dados médios diários de: pressão atmosférica, temperatura do ponto de orvalho, umidade relativa do ar e velocidade dos ventos, como também os totais diários de: precipitação, pressão atmosférica e temperaturas, sem indicação da hora de medição, e a disponibilidade dos dados variou de acordo com cada estação. Para garantir a consistência e completude do conjunto de dados, foi realizado um tratamento prévio dos dados em planilha eletrônica, incluindo o preenchimento de falhas e a correção de dados inconsistentes.

O preenchimento de falhas nos dados foi realizado com base na técnica das médias aritméticas para períodos com poucas falhas e na média móvel para períodos com muitas falhas. Em ambos os casos, a técnica se baseou na comparação com os dados do mesmo período do ano anterior e do ano posterior, garantindo a coerência sazonal da informação.

A escolha do período de coleta de dados (2003-2022) foi definida pela

disponibilidade dos dados meteorológicos, considerando que as falhas nesses elementos são o fator restritivo para a análise. Os dados meteorológicos utilizados neste estudo foram coletados em 17 estações meteorológicas automáticas da FUNCEME (Figura 2), distribuídas em três diferentes condições climáticas representativas do estado do Ceará: i) litoral [2]: Acaraú e Fortaleza; ii) serra [3]: Barbalha, Guaramiranga e Tianguá; e iii) sertão [12]: Aiuaba, Campos Sales, Crateús, Iguatu, Itapipoca, Jaguaribe, Jaguaruana, Morada Nova, Quixadá, Quixeramobim, Sobral e Tauá.

Figura 2 – Localização das estações meteorológicas analisadas e seus respectivos municípios



Fonte: (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2011)

O processo metodológico teve início com a análise da umidade específica em diferentes estações do ano, visando categorizar o potencial por período climático. Posteriormente, os dados da umidade específica foram empregados para calcular umidade específica média, sem levar em consideração a estação do ano.

Foram escolhidos seis municípios que abrangem diferentes climas, incluindo litoral, serra e sertão, aplicando modelos de cálculo da água precipitável para obter valores

comparáveis entre si, permitindo assim uma estimativa mais próxima da realidade.

Pesquisar o litoral, a serra e o sertão do Estado do Ceará é fundamental para compreender a rica diversidade da região, desde o clima, vegetação e os recursos hídricos. Essa pesquisa é importante para a preservação ambiental, com foco na conservação da biodiversidade, especialmente em biomas como a caatinga e a restinga, e no uso sustentável da água, principalmente nas serras, importantes fontes de água para a região.

Litoral: A faixa de terra que margeia o Oceano Atlântico no semiárido brasileiro, caracterizada por vegetação de restinga e manguezais, dunas, falésias e praias. O clima é mais úmido e ameno que o interior, com chuvas concentradas no verão. Serra: Região montanhosa com altitudes variadas, que abriga vegetação diversificada, como mata ciliar, campos rupestres e áreas de mata seca. O clima é mais ameno que o sertão, com temperaturas mais baixas e umidade maior. As serras são importantes fontes de água para a região. Sertão: A área mais extensa e representativa do semiárido brasileiro, caracterizada por clima seco e semiárido, com longos períodos de estiagem. A vegetação predominante é a caatinga, adaptada às condições de seca e escassez de água. As temperaturas são elevadas e as chuvas são irregulares, concentradas em curtos períodos.

### 3.2 Cálculo da umidade específica ( $q_v$ )

Existem diversas maneiras de especificar a quantidade de vapor d'água no ar. A maneira mais utilizada, é especificar diretamente a massa do vapor d'água presente em uma unidade de massa de ar seco, utilizando a equação de gases ideais para misturas.

A quantidade de vapor d'água presente na atmosfera é determinada a partir da pressão real do vapor ( $e$ ) e da pressão atmosférica ( $p$ ). A massa de vapor d'água por unidade de massa de ar úmido, ou seja, a umidade específica ( $q_v$ ), conforme Equação 1:

$$q_v = 0,622 \frac{e}{p} \quad (1)$$

Em que: ( $q_v$ ) é expressa em kg/kg, ( $e$ ) e ( $p$ ) devem ser expressas nas mesmas unidades de pressão, em geral, kPa.

A quantidade máxima de vapor d'água presente na atmosfera é função da temperatura do ar. Ao atingir o valor máximo para dada temperatura, a pressão real de vapor ( $e$ , em Pascal) atinge seu valor máximo ( $e_s$ , em Pascal) e o ar se torna saturado (SILVA *et al.*, 2019;

MIRANDA, 2016) (Equação 2 e 3).

$$e = 611 \exp\left(\frac{17,27T_d}{237,3+T_d}\right) \quad (2)$$

Em que:  $T_d$  é a temperatura (em graus Celsius) do ponto de orvalho;

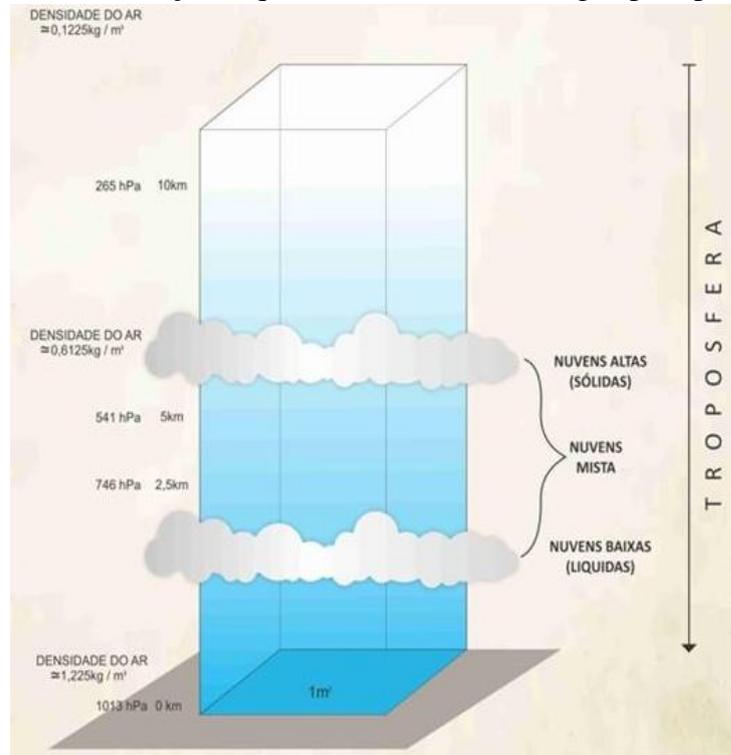
$$e_s = 611 \exp\left(\frac{17,27T}{237,3+T}\right) \quad (3)$$

Em que:  $T$  é a temperatura (em graus Celsius) do ponto de ar

### 3.3 Modelo para estimativa da água precipitável

A coluna de água precipitável pode ser estimada utilizando diferentes métodos e modelos (Figura3), variando de acordo com o contexto e os dados disponíveis. Todos esses métodos se baseiam em informações históricas de precipitação, padrões climáticos e outros elementos para estimar a quantidade de água que será precipitada em uma determinada região e período. Além disso, existem modelos mais sofisticados e especializados, como os utilizados em pesquisas científicas e estudos climáticos, tais como os modelos de simulação climática global, que incorporam uma ampla gama de variáveis atmosféricas e oceanográficas para prever a precipitação e outros fenômenos climáticos.

Figura 3 – Ilustração esquemática da coluna de água precipitável



Fonte: Autor (2024)

Água precipitável (PW) é definida como a quantidade de vapor d'água contido numa coluna de seção vertical unitária e que vai da superfície até o topo da atmosfera, sendo expressa matematicamente por (VIANELLO; ALVES, 1991) (Equação 4):

$$PW(mm) = \frac{1}{g \cdot \rho} \int_{P_{Tropo}}^{P_{Solo}} qv \cdot dp \quad (4)$$

Em que: (PW) é a água precipitável (mm), (g) a aceleração da gravidade ( $m/s^2$ ), ( $\rho$ ) massa específica ( $kg/m^3$ ), ( $qv$ ) é a umidade específica ( $kg/kg$ ) e (dp) é um elemento infinitesimal de pressão para o intervalo de ( $P_{Solo}$ ) e ( $P_{topo}$ ) para a pressão (Pa) à superfície e topo respectivamente.

O modelo de Harrison, apesar de ter sido desenvolvido para regiões úmidas, pode ser aplicado em áreas semiáridas por sua simplicidade e a facilidade de acesso aos dados de temperatura, pressão atmosférica e umidade relativa, geralmente disponíveis em estações meteorológicas. Ele permite uma estimativa da água precipitável total, parâmetro importante para entender a disponibilidade de água na atmosfera, mesmo em condições semiáridas. Apesar

de suas simplificações e precisão limitada, especialmente em ambientes com baixa umidade atmosférica, o modelo serve como ferramenta para analisar a dinâmica atmosférica e comparar a água precipitável em diferentes regiões semiáridas. A relação com dados de precipitação locais pode ajudar em seus resultados. É importante lembrar que, em regiões semiáridas, o modelo de Harrison deve ser utilizado com cautela, combinando-o com outras fontes de informação, quando disponíveis.

O método de Harrison, desenvolvido em 1995, foi escolhido para estimar a água precipitável (PW) devido à sua simplicidade e eficácia, especialmente quando se utiliza dados de sondagens atmosféricas coletadas em estações meteorológicas. Sua implementação é relativamente fácil e demonstra boa precisão na estimativa de PW, a sensibilidade do método às variações de PW permite a detecção de mudanças na umidade atmosférica, tornando-o útil para diversas aplicações, incluindo monitoramento climático, previsão meteorológica, estudos hidrológicos e análise de eventos climáticos extremos. A escolha do método de Harrison se justifica por diversos fatores: simplicidade, pois é relativamente fácil de implementar e requer apenas dados de sondagens atmosféricas, que são amplamente disponíveis; boa precisão na estimativa de PW; e a disponibilidade de dados de sondagens atmosféricas coletadas por estações meteorológicas. No entanto, como qualquer estudo climático, o método de Harrison está sujeito a incertezas inerentes, tanto nos dados quanto no modelo. Erros de medição, representatividade espacial limitada e variações temporais nos dados de sondagem podem afetar a precisão das estimativas de PW. Além disso, as simplificações e a escolha dos parâmetros do modelo também contribuem para a incerteza. O método é sensível a diferentes pressupostos meteorológicos, como a pressão atmosférica, variações de temperatura e umidade, que podem influenciar as estimativas de PW. Para avaliar a confiabilidade dos resultados, é essencial quantificar as incertezas e analisar a sensibilidade do modelo. Isso pode ser feito através de análises de sensibilidade, simulando o modelo com diferentes entradas e parâmetros, e validando os resultados com dados observados.

Para estimar a água precipitável pelo método de Harrison (1995), consiste em determinar o conteúdo de vapor de água em cada nível da atmosfera, começando na superfície e subindo até o nível de 300 hPa. Para isso foram utilizados os dados de umidade específica e pressão barométrica. Depois de feito o cálculo do vapor de água para o nível da atmosfera, somam-se os valores encontrados, tendo então o valor da água precipitável total (ULGUIM PEDRA; OLIVEIRA FILHO, 2007; HARRISON, 1995). Equação que quantifica a água precipita (Wp) pelo método Harrison (Equação 4):

$$PW(\text{mm}) = 10,2 \cdot q_v \cdot \Delta p \quad (5)$$

Em que: PW – Água precipitável (mm);  $q_v$  – Umidade específica média (kg/kg);  
 $\Delta p$  – Variação de pressão atmosférica na camada discretizada (hPa).

Salienta-se que a pressão barométrica média à nível do mar é de aproximadamente 101,325 kPa, ou seja, 1013 hPa e, so modelo supracitado, as camadas são discretizadas de forma predefinida nas pressões de 1000, 925, 850, 700, 500, 400 e 300 hPa conforme a Equação 6:

$$PW_{\text{total}} = PW_{p1000} + PW_{p925} + PW_{p850} + PW_{p700} + PW_{p500} + PW_{p400} + PW_{p300} \quad (6)$$

Onde:  $PW_{\text{total}}$  - Água precipitável na atmosfera;  $PW_i$ - Água precipitável na camada de pressão  $i$ ;

O modelo supracitado subdivide a atmosfera em subcamadas com alturas predefinidas de acordo com a pressão barométrica. A equação da água precipitável total evidencia a discretização da atmosfera em subcamadas, cuja soma das águas precipitáveis é a água precipitável total.

Os padrões de precipitação estão intimamente ligados à umidade na atmosfera, assim como a evaporação, condensação e processos de transporte. Os dados obtidos são desordenados e não permitem boas estimativas da condensação e do transporte vertical do vapor de água, que podem ser frequentemente dominadas por processos convectivos em baixa escala, tornando difícil sua avaliação de maneira global. A coluna de água precipitável (PWC) na atmosfera terrestre é dada pela medida desta coluna, desde a superfície do planeta até a pressão atmosférica desejada (CERQUEIRA JÚNIOR *et al.*, 2014).

### 3.4 Testes estatísticos

Segundo Wilks (2011), os principais métodos estatísticos aplicados na análise de dados climatológicos, meteorológicos e hidrológicos se basearam-se em modelos teóricos como a matriz de correlação (*Pearson*), o teste de tendência de *Mann-Kendall*, além da regressão linear simples com densidade e histograma de densidade. Nesse sentido, é importante verificar a normalidade da distribuição dos dados para uma descrição precisa da amostra.

Alguns conjuntos de dados meteorológicos exibem distribuições não normais, especialmente em eventos com grande variabilidade, onde o desvio padrão é significativamente maior que a média, desaconselhando o uso de técnicas estatísticas que presumem normalidade. Mesmo aumentando o tamanho da amostra, não é possível corrigir os erros de estimativa decorrentes do uso de distribuições que não correspondem às características dos dados analisados.

O teste de *Mann-Kendall* é usado para determinar se há uma tendência significativa (ascendente, descendente ou nenhuma) em uma série temporal de dados. Ele é robusto a *outliers* e distribuições não normais, sendo amplamente utilizado na detecção de mudanças climáticas ao longo do tempo. Segundo Cabral (2018), o teste estatístico não paramétrico de *Mann-Kendall* é o método que melhor avalia e analisa possíveis mudanças climáticas em séries temporais climatológicas, indicando aproximadamente o período ou local inicial de determinada tendência.

Um importante índice de correlação para dados é o coeficiente de *Pearson*, o qual é um método para avaliar o grau de relação linear entre variáveis quantitativas. É frequentemente usado para investigar a relação entre diferentes parâmetros climáticos. No contexto dos estudos climáticos, a correlação de *Pearson* é frequentemente empregada para investigar as interações entre diferentes elementos climáticos (SILVA; BEZERRA; AZZONI, 2016).

O histograma de densidade que é uma representação gráfica da distribuição dos valores em uma série temporal. Ele fornece uma visualização mais suave da distribuição dos dados ao longo do tempo. O uso do histograma de densidade em análises climáticas tem demonstrado sua utilidade em uma variedade de contextos, incluindo estudos de mudanças climáticas, análise de extremos climáticos, modelagem hidrológica e muito mais. Essa ferramenta estatística fornece uma abordagem sistemática e eficaz para explorar a complexidade dos dados climáticos temporais e extrair informações úteis para uma ampla gama de aplicações (FREITAS; SOUZA, 2017).

A regressão linear simples com densidade é uma técnica estatística fundamental amplamente utilizada para entender e modelar a relação entre uma variável independente (ou explanatória) e uma variável dependente (ou resposta). Esta técnica é especialmente útil em estudos exploratórios e preditivos, fornecendo conhecimentos valiosos sobre a natureza e a força das relações entre variáveis (ARNOLD; CASTILLO, 2008).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Estimativa da umidade específica ( $q_v$ )

Foi realizada uma análise do comportamento da temperatura mínima média do ar ambiente e da temperatura média de ponto de orvalho, no intento de mensurar a umidade específica ( $q_v$ ), nas quatro estações do ano. Para analisar o comportamento das variáveis meteorológicas e sua influência na composição da umidade específica, por município e ao longo do ano (Tabela 2).

Tabela 2 – Distribuição temporal da umidade específica média (g/kg) (2003 a 2022)

Município [Altitude (m)]	Condições climáticas	N	Verão Média amostral ( $\mu$ ) $\pm$ desvio-padrão da amostra ( $\sigma$ )	Outono	Inverno	Primavera
Acaraú [67]	Litoral	3954	17,01 $\pm$ 0,90	17,51 $\pm$ 0,69	15,13 $\pm$ 1,00	15,23 $\pm$ 0,83
Fortaleza [30]		7071	16,74 $\pm$ 0,77	16,88 $\pm$ 0,78	14,73 $\pm$ 0,87	15,25 $\pm$ 0,76
Barbalha [409]	Serra	5418	15,53 $\pm$ 1,73	15,23 $\pm$ 1,42	10,71 $\pm$ 1,60	12,02 $\pm$ 2,03
Guaramiranga [865]		4814	14,94 $\pm$ 0,76	15,29 $\pm$ 0,75	13,28 $\pm$ 1,01	14,82 $\pm$ 0,80
Tianguá [756]		1465	15,46 $\pm$ 0,89	15,54 $\pm$ 0,81	13,05 $\pm$ 1,01	13,8 $\pm$ 0,90
Aiuaba [585]		6084	12,13 $\pm$ 1,69	13,06 $\pm$ 0,03	9,48 $\pm$ 1,08	9,18 $\pm$ 0,02
Campos Sales [577]	Sertão	4593	15,59 $\pm$ 1,82	14,94 $\pm$ 1,89	11,04 $\pm$ 2,05	12,43 $\pm$ 2,54
Crateús [298]		1139	15,88 $\pm$ 1,53	16,11 $\pm$ 1,62	12,13 $\pm$ 1,64	12,9 $\pm$ 1,21
Iguatu [221]		5449	16,03 $\pm$ 1,97	15,81 $\pm$ 1,69	10,03 $\pm$ 1,76	12,54 $\pm$ 1,55
Itapipoca [104]		4218	16,12 $\pm$ 1,08	16,63 $\pm$ 1,08	13,51 $\pm$ 1,19	14,15 $\pm$ 0,86
Jaguaribe [149]		3940	14,25 $\pm$ 1,77	15,01 $\pm$ 1,69	10,94 $\pm$ 1,54	11,38 $\pm$ 1,06
Jaguaruana [49]		5346	15,53 $\pm$ 1,19	16,14 $\pm$ 1,28	12,35 $\pm$ 1,31	13,63 $\pm$ 1,00
Morada Nova [45]		5424	15,52 $\pm$ 1,61	16,52 $\pm$ 1,61	14,26 $\pm$ 1,51	12,5 $\pm$ 1,21
Quixadá [193]		829	16,58 $\pm$ 1,21	16,81 $\pm$ 1,22	13,27 $\pm$ 0,97	14,17 $\pm$ 1,15
Quixeramobim [221]		4731	14,13 $\pm$ 1,45	16 $\pm$ 1,06	11,75 $\pm$ 1,53	11,94 $\pm$ 1,09
Sobral [92]		6605	16,09 $\pm$ 1,29	16,86 $\pm$ 1,27	13,24 $\pm$ 1,33	13,34 $\pm$ 0,99
Tauá [410]	4831	13,88 $\pm$ 2,01	14,66 $\pm$ 1,94	10,2 $\pm$ 1,79	10,76 $\pm$ 1,73	

N: número de observações;  $\mu$ : média amostral;  $\sigma$ : desvio padrão da amostra. Fonte: Autor (2023)

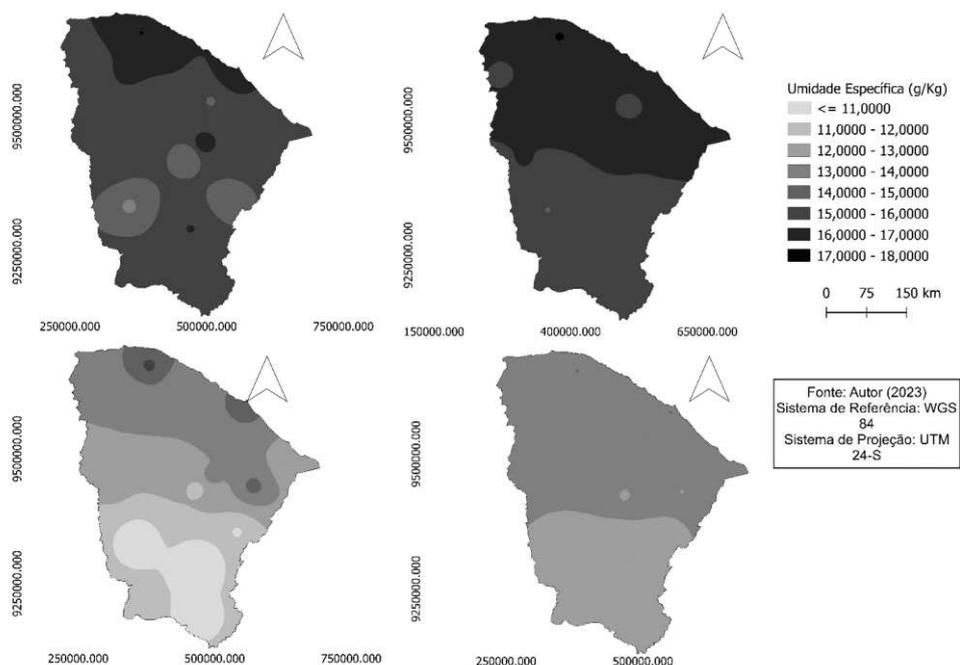
Observa-se na Tabela 2 a umidade específica média (g/kg) em 17 municípios cearenses, divididos pelas estações do ano (verão, outono, inverno e primavera) para o período de 2003 a 2022. Os dados, coletados pela FUNCEME, representam médias diárias, sem a indicação da hora de medição. Observa-se que a umidade específica média varia significativamente entre os municípios, com valores mais altos na faixa litorânea (Acaraú e Fortaleza) e mais baixos no sertão (Aiuaba, Campos Sales e Tauá). A altitude parece ter um papel menos direto na umidade específica em relação à temperatura, pois municípios com altitudes elevadas, como Tianguá e Guaramiranga, não apresentam os menores valores de

umidade. O padrão sazonal é caracterizado por valores mais altos no verão e outono, e mais baixos no inverno e primavera, com algumas variações entre os municípios. O desvio padrão da umidade específica também varia entre os municípios, refletindo a variabilidade local. Municípios como Barbalha e Iguatu apresentam desvios padrão maiores, indicando uma maior variabilidade da umidade ao longo do ano. Em suma, a Tabela 2 demonstra a diversidade na umidade específica média no Ceará, com variações entre os municípios. O padrão sazonal de umidade é caracterizado por valores mais altos no verão e outono, e mais baixos no inverno e primavera. A disponibilidade de dados para cada estação e município varia, o que pode influenciar a análise da variabilidade climática.

Silva e Sousa (2009), usam em seus trabalhos a umidade específica como uma medida para estimar o orvalho em uma determinada região. Portanto, um alto valor de umidade específica em conjunto com condições de resfriamento do ar pode indicar um potencial aumentado para a formação de orvalho. No entanto, é importante considerar outros fatores meteorológicos, como temperatura do ar, velocidade do vento e presença de nuvens, que também influenciam na formação do orvalho.

As médias de umidade específica variam entre as estações do ano e entre as cidades, refletindo a influência de fatores como latitude, altitude e proximidade com corpos d'água (Figura 4).

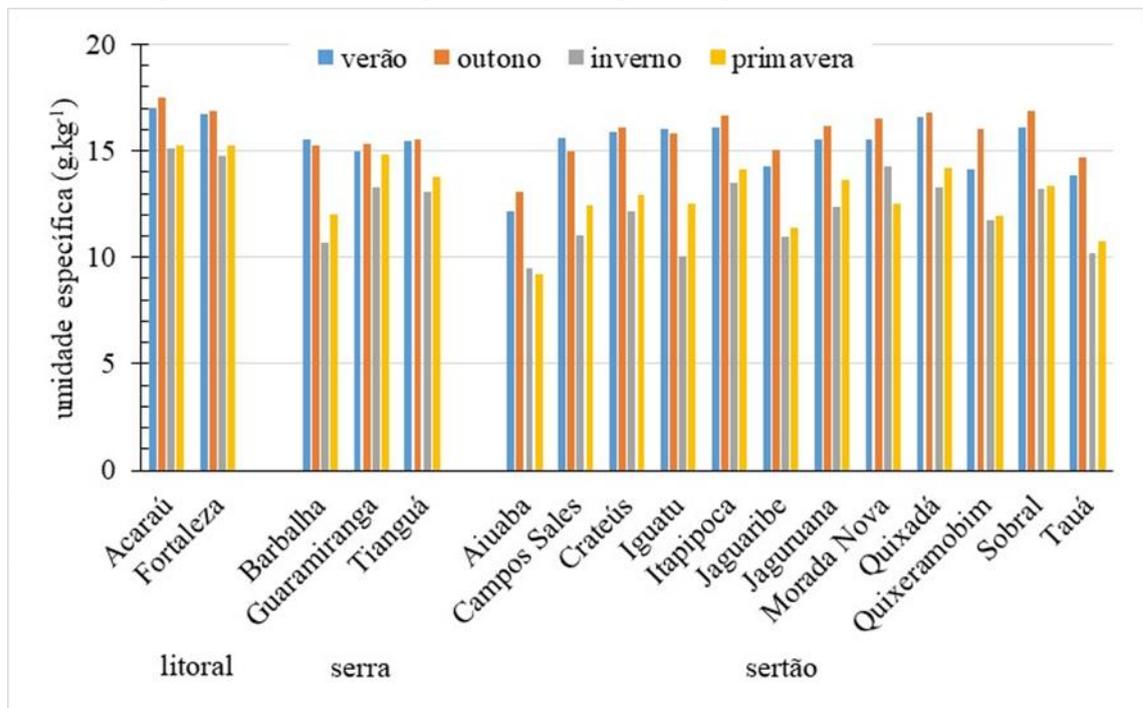
Figura 4 – Distribuição espacial da umidade específica diária média por estação do ano



Fonte: Autor (2024)

Os desvios padrão da umidade específica indicam a dispersão dos dados em torno das médias. Locais com desvios padrão mais altos podem experimentar uma maior variabilidade nas temperaturas ao longo do ano. Entretanto, observam-se padrões sazonais claros, com temperaturas mais altas no verão e mais baixas no inverno. A magnitude dessas variações pode diferir significativamente entre locais com altitudes mais elevadas e que tendem a registrar temperaturas médias mais baixas, como Guaramiranga e Tianguá com altitudes de 865 m e 756 m, respectivamente. A compreensão das variações sazonais nas temperaturas é essencial para entender os impactos das mudanças climáticas regionais. Observa-se na (Figura 5) a distribuição da umidade específica para a três condições climáticas estudadas por estações do ano.

Figura 5 – Umidade específica média por estação do ano (2003-2022)



Fonte: Autor (2024)

Observa-se que no outono é o período do ano com maior quantidade de umidade específica ( $q_v$ ), enquanto no inverno é caracterizado pelo menor nível de umidade específica ( $q_v$ ) no Estado do Ceará. Durante o outono, resquícios das chuvas da estação chuvosa anterior podem ser percebidos. Essa condição propicia uma evaporação significativa, contribuindo para um aumento na quantidade de vapor na atmosfera. Contudo, conforme o inverno se aproxima, a estação seca ganha intensidade, reduzindo a disponibilidade de água para evaporação e, conseqüentemente, diminuindo o teor de umidade na atmosfera.

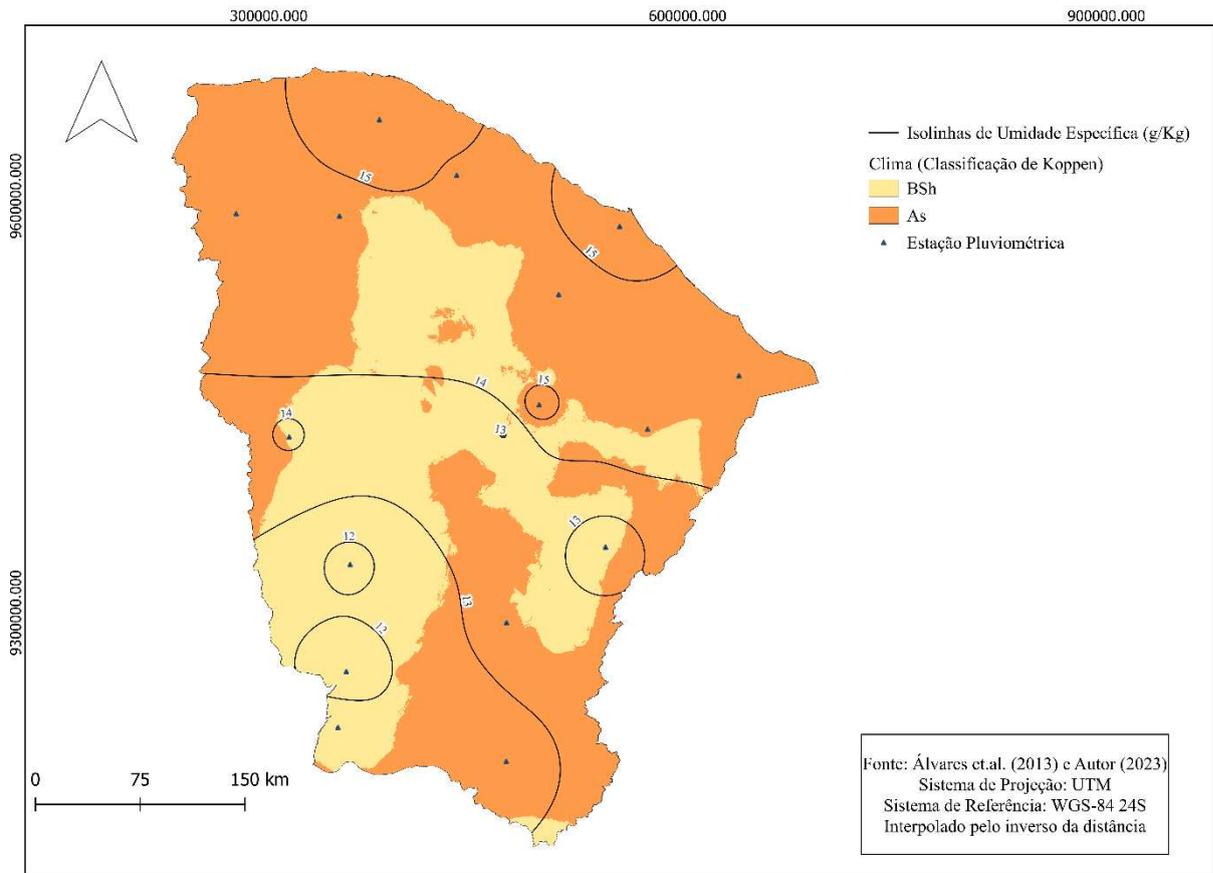
Além disso, durante o outono, as temperaturas começam a declinar após o período mais quente do ano, mas ainda não atingiram seus patamares mais baixos. Esse cenário de temperaturas mais amenas favorece uma evaporação mais expressiva da água presente nos solos e corpos d'água, contribuindo para o aumento do vapor atmosférico. Por outro lado, no inverno, as temperaturas tendem a ser mais baixas, o que reduz a taxa de evaporação e, conseqüentemente, a quantidade de vapor na atmosfera.

Ademais, durante o outono, os padrões de vento podem propiciar a chegada de massas de ar úmidas provenientes do oceano, especialmente em regiões costeiras próximas. Esse influxo de ar úmido pode incrementar a umidade atmosférica durante essa estação. No entanto, no inverno, os padrões de vento podem se alterar, direcionando massas de ar mais secas do interior do continente para a região, o que tende a reduzir a quantidade de vapor na atmosfera.

Esses fatores combinados explicam a variação sazonal na quantidade de vapor na atmosfera do semiárido nordestino, com um aumento durante o outono devido a fatores como a evaporação residual e temperaturas amenas, seguido por uma diminuição durante o inverno, influenciada pela intensificação da estação seca e mudanças nos padrões de vento.

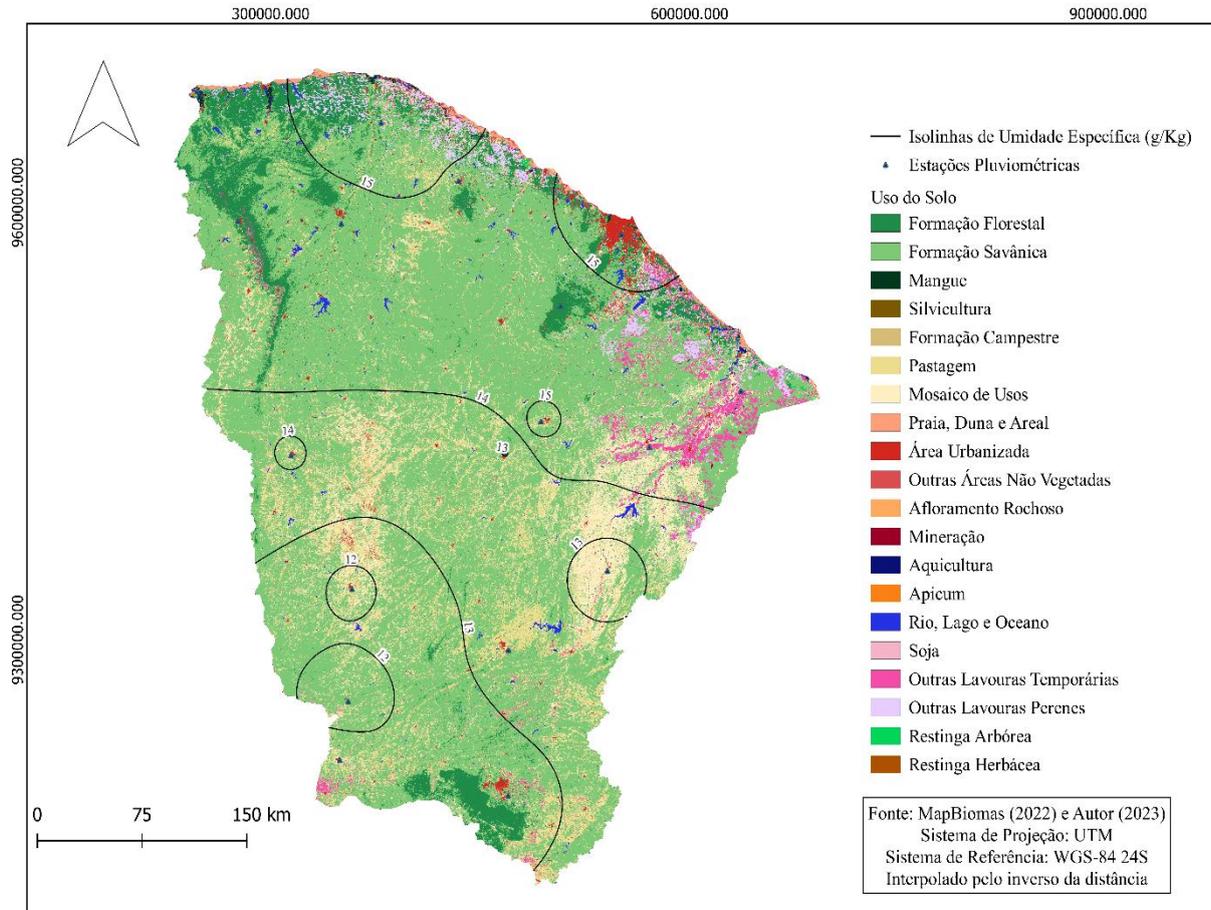
Observa-se a espacialização da umidade específica mediana na atmosfera para o estado do Ceará com ênfase nas relações do clima (Figura 6) e o uso e ocupação do solo (Figura 7). A interpretação dos mapas climáticos e de uso do solo reforça os dados encontrados sobre a umidade específica. O mapa climático revela que os níveis mais baixos de umidade específica estão concentrados nas regiões semiáridas. Por sua vez, o mapa de uso do solo sugere que as áreas desgastadas pela pastagem estão associadas a baixos índices de umidade específica.

Figura 6 – Carta de umidade específica e classificação climática do Ceará



Fonte: Autor (2023)

Figura 7 – Carta de umidade específica e uso da ocupação do solo no Ceará



Fonte: Autor (2024) adaptado de MAPBIOMAS (2022)

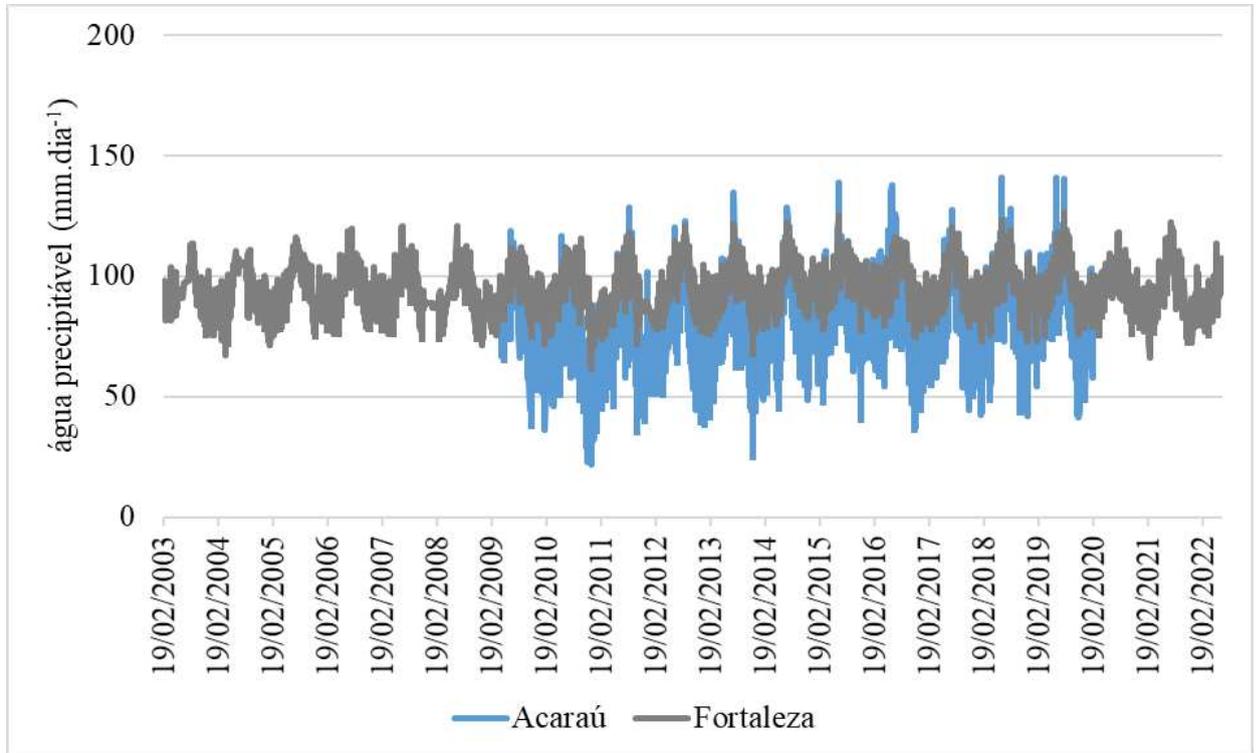
#### 4.2 Estimativa da água precipitável pelo modelo de Harrison sob três diferentes condições climáticas

A aplicação do modelo de Harrison permite avaliar sua eficácia e precisão na estimativa da água precipitável, identificando eventuais discrepâncias. Além disso, entender como esse modelo se comporta em diferentes condições climáticas e geográficas ajuda a aprimorar as previsões e adaptá-las às necessidades locais. Com o modelo de Harrison, é possível também analisar como diferentes abordagens teóricas e dados de entrada influenciam os resultados, fornecendo conhecimentos valiosos para o desenvolvimento de modelos mais robustos e precisos no contexto específico do semiárido cearense. Essa comparação contribui para o avanço da ciência climática, hidrológica e meteorológica, além de subsidiar práticas de manejo agrícola e ambiental eficientes e sustentáveis na região.

Observa-se o comportamento da água precipitável, em Acaraú e Fortaleza – litoral (Figura 8); Guaramiranga e Tianguá – serra (Figura 9); e Morada Nova e Crateús – sertão (Figura

10).

Figura 8 – Água precipitável sob as condições climáticas do litoral para os municípios de Acaraú e Fortaleza



Fonte: Autor (2024)

A análise da água precipitável em Acaraú e Fortaleza, ambas cidades localizadas no litoral do Ceará, revela padrões sazonais influenciados pela proximidade com o Oceano Atlântico.

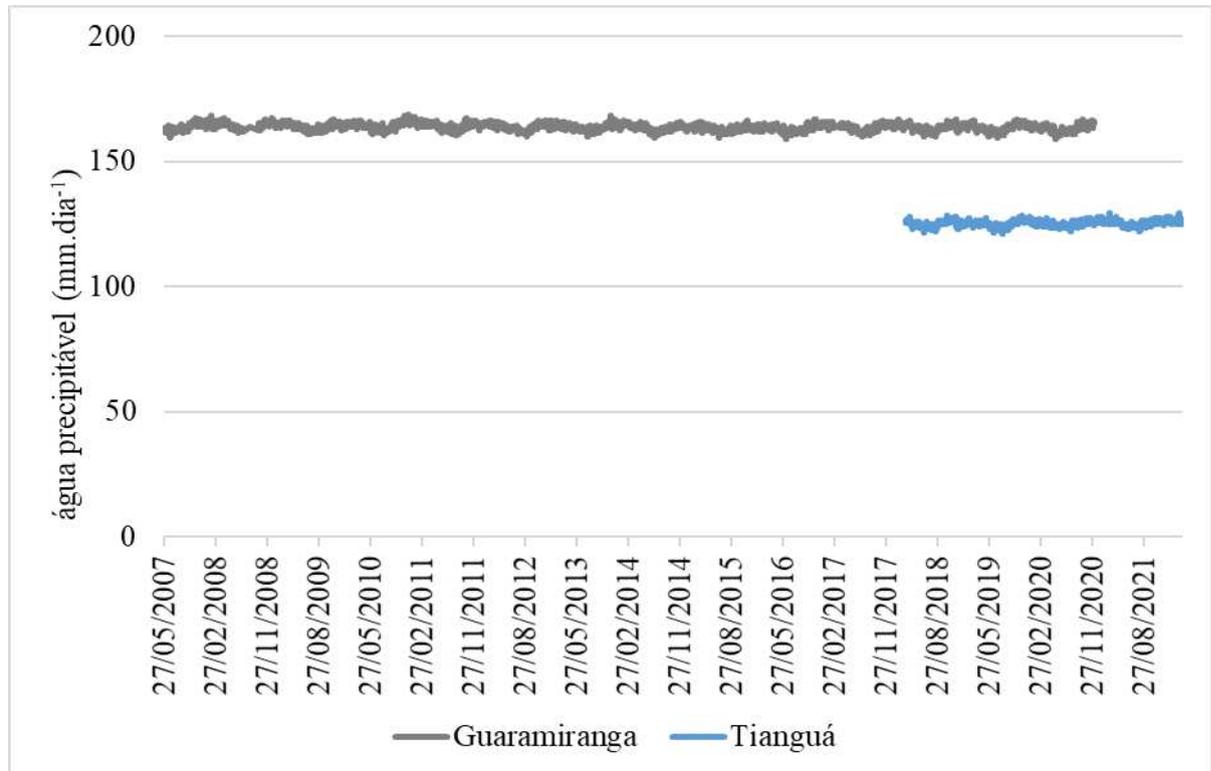
Em Acaraú, a água precipitável apresenta uma variação sazonal, com períodos de aumento e diminuição ao longo do ano, seguindo as estações do ano. No final de abril, durante a transição do outono para o inverno, os valores tendem a ser mais elevados, indicando um aumento na umidade atmosférica. Essa umidade se estabiliza durante os meses de junho e julho, com poucas flutuações significativas, sugerindo condições atmosféricas mais estáveis durante o inverno. A partir de agosto, com a chegada da primavera, notamos um aumento gradual na água precipitável, indicando uma mudança sazonal para condições mais úmidas em preparação para a estação chuvosa.

Em Fortaleza, o modelo de Harrison destaca uma sazonalidade na água precipitável, com variações significativas entre os valores mínimos e máximos. Os picos de água precipitável, ocorrendo entre fevereiro e maio, coincidem com a estação chuvosa na região costeira. A proximidade com o oceano contribui para a maior umidade atmosférica,

resultando em chuvas mais intensas. Durante os meses de junho a dezembro, a água precipitável diminui, indicando uma atmosfera menos propícia à ocorrência de chuvas significativas, em consonância com as características semiáridas da região.

É fundamental lembrar que a interpretação dos dados de água precipitável deve levar em consideração outros fatores climáticos, como precipitação, padrões de ventos, pressão atmosférica e circulação atmosférica.

Figura 9 – Água precipitável sob as condições climáticas da serra para os municípios de Guaramiranga e Tianguá

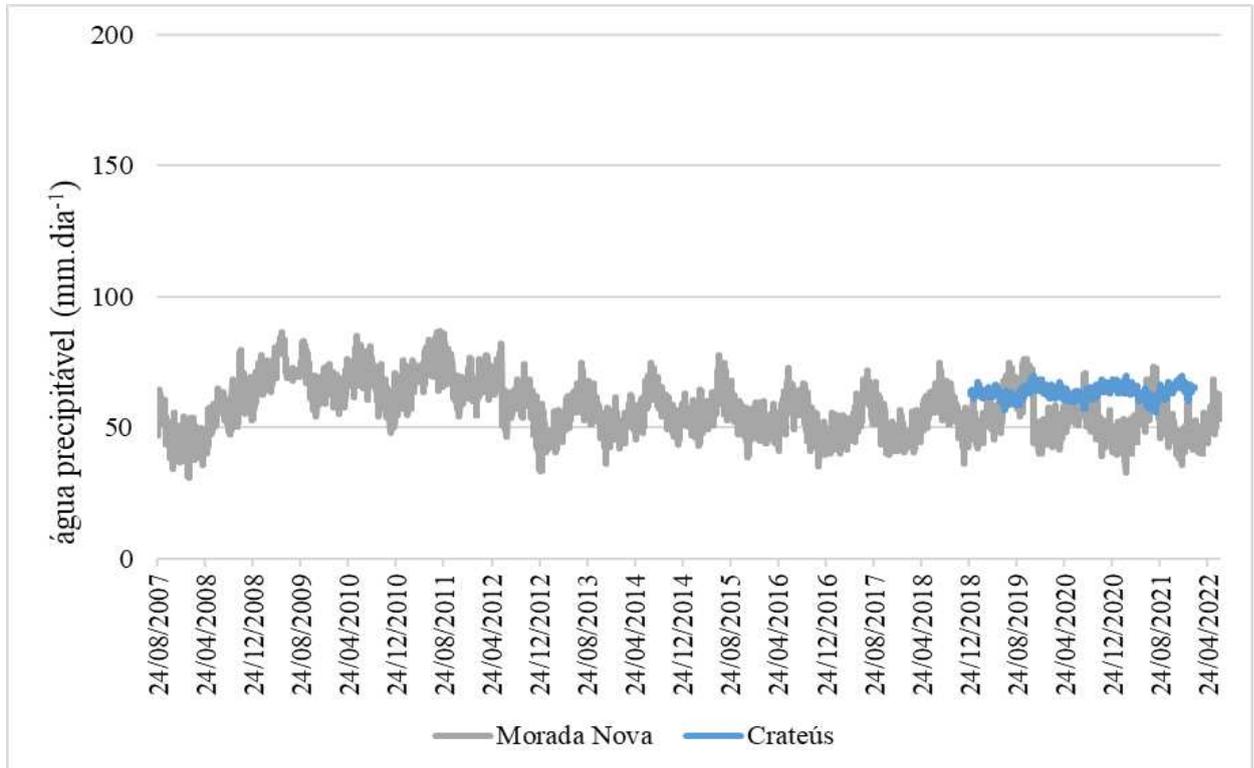


Fonte: Autor (2024)

A análise da água precipitável em Guaramiranga e Tianguá, ambas localizadas em regiões serranas do Ceará, revela padrões influenciados pelas características geográficas e climáticas do local. Em ambas as regiões, a topografia desempenha um papel fundamental na dinâmica da água precipitável.

Nestas regiões, os dados indicam uma variação sazonal, com ciclos característicos de redução e aumento da água precipitável, mas apesar dessas oscilações, os volumes de água precipitável se mantêm relativamente elevados, considerando que a região está inserida no semiárido cearense. A influência da topografia local e das áreas preservadas contribui para a compreensão da dinâmica da água precipitável na serra.

Figura 10 – Água precipitável sob as condições climáticas do sertão para os municípios de Morada Nova e Crateús



Fonte: Autor (2024)

A análise da água precipitável em Crateús e Morada Nova, ambas localizadas no sertão do Ceará, revela padrões sazonais influenciados pelas características climáticas da região semiárida. Em Crateús, o modelo de Harrison indica que os valores diários de água precipitável são relativamente próximos, com poucas variações significativas ao longo do período. Durante a estação chuvosa, tipicamente de janeiro a maio, os índices de água precipitável aumentam, refletindo o aporte das chuvas. Na estação seca, que vai de julho a dezembro, esses valores tendem a diminuir, seguindo o padrão esperado para a região.

Em Morada Nova, a análise dos resultados evidencia uma variação sazonal na água precipitável. Durante a estação chuvosa, abrangendo os meses de fevereiro a maio, observa-se um incremento na quantidade de água precipitável, em consonância com as expectativas para a região. Em contrapartida, durante a estação seca, compreendida entre os meses de junho a dezembro, registra-se uma redução significativa nos valores de água precipitável, refletindo a escassez de chuvas característica do clima semiárido.

A análise dos dados de água precipitável para as cidades de Acaraú e Fortaleza, localizadas no litoral, revela padrões sazonais que refletem as transições entre estações. Em Acaraú, observa-se um aumento gradual nos valores de água precipitável durante os meses

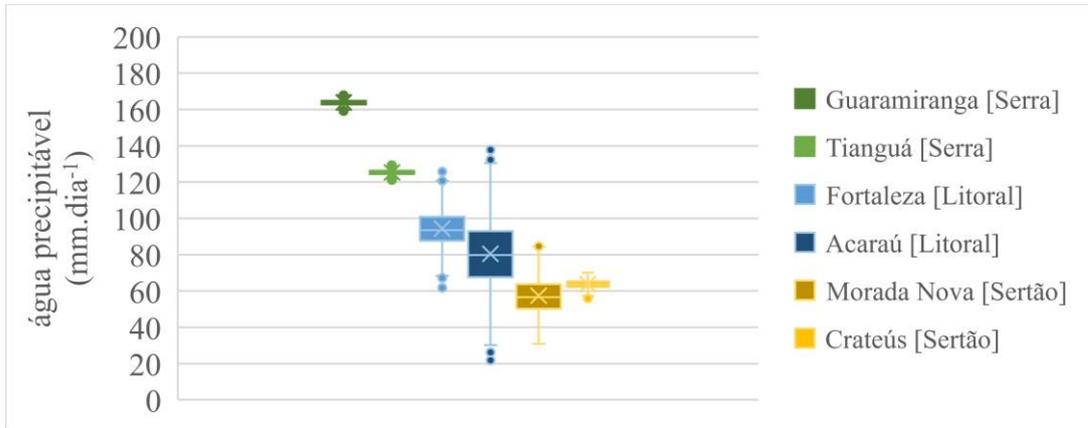
de abril, indicando uma tendência de maior umidade atmosférica no período que antecede o inverno. Durante o inverno, representado pelos meses de junho e julho, os valores permanecem estáveis, sugerindo condições atmosféricas mais estáveis. À medida que se aproxima a primavera, os valores aumentam gradualmente, preparando a região para a estação chuvosa. Em Fortaleza, a proximidade com o oceano contribui para chuvas mais intensas durante os meses de fevereiro a maio, seguidos por uma diminuição durante a estação seca.

Em Guaramiranga, não há uma direção clara em termos de tendências sazonais, evidenciando uma variabilidade natural. Uma análise mais detalhada dos dados poderia fornecer conhecimentos sobre as flutuações sazonais. Tianguá apresenta uma leve sazonalidade, com pequenas oscilações nos valores ao longo do tempo.

Em Crateús e Morada Nova, localizadas no sertão, os valores de água precipitável refletem os ciclos característicos de estação seca e chuvosa. Durante a estação chuvosa, os valores aumentam, enquanto na estação seca diminuem. Essas análises destacam a importância de considerar diversos fatores ambientais e climáticos na compreensão dos padrões de água precipitável em diferentes regiões.

Observa-se na (Figura 11) a água precipitável sob diferentes condições climáticas no estado do Ceará, numa permite uma visualização eficiente da distribuição dos dados em diferentes condições climáticas, pode-se identificar *outliers*, comparar a distribuição da água precipitável entre as regiões litoral, serra e sertão, analisar a assimetria e a variabilidade, e interpretar a curtose. A comparação entre as regiões evidencia as características específicas de cada local e a influência do clima. A análise da assimetria e da variabilidade nos ajuda a entender se a água precipitável tende a ser mais alta ou mais baixa que a média e como essa tendência varia entre as regiões.

Figura 11 – Água precipitável sob diferentes condições climáticas no estado do Ceará



Fonte: Autor (2024)

No litoral, as cidades de Acaraú e Fortaleza apresentam uma distribuição levemente assimétrica, com uma tendência para a assimetria positiva, indicando a possível presença de valores discrepantes (*outliers*). A variabilidade da água precipitável é considerável em Acaraú e moderada em Fortaleza.

Na serra, as cidades de Guaramiranga e Tianguá demonstram uma distribuição levemente assimétrica, com uma ligeira tendência para a assimetria negativa. A curtose próxima a zero sugere que a distribuição se assemelha a uma distribuição normal, com caudas um pouco mais finas. A variabilidade é baixa em ambas as localidades.

No sertão, as cidades de Crateús e Morada Nova apresentam uma distribuição levemente assimétrica. Em Crateús, a tendência é para a assimetria negativa, enquanto em Morada Nova é para a positiva. A curtose próxima a zero indica que as distribuições se assemelham a uma distribuição normal. A variabilidade é moderada em Crateús e considerável em Morada Nova.

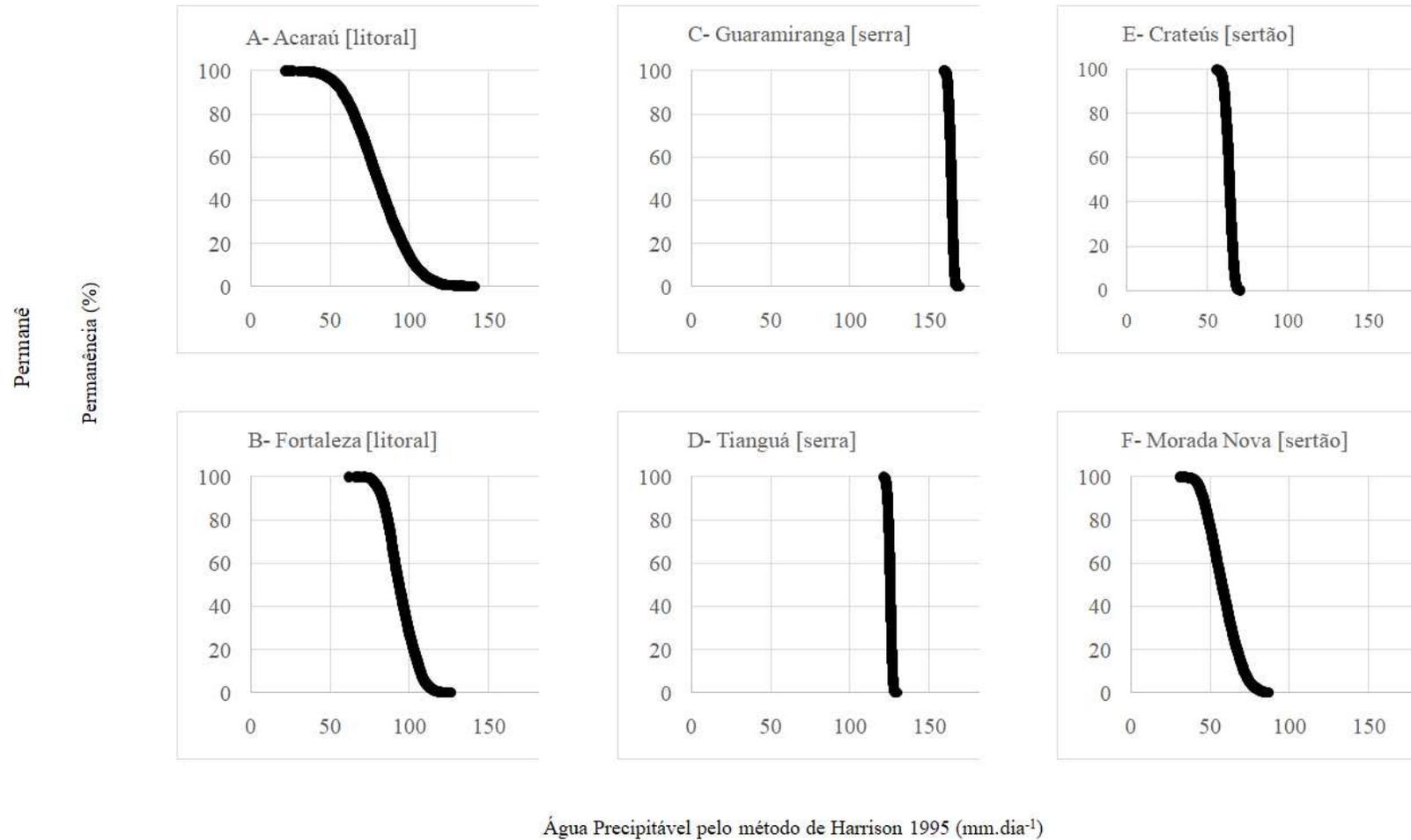
A estimativa da água precipitável em regiões semiáridas, é fundamental para compreender a dinâmica atmosférica e o potencial hídrico, enfrentar os desafios relacionados à complexidade do fenômeno e às limitações dos métodos de pesquisa. O modelo de Harrison, embora amplamente utilizado pela sua simplicidade, contribui para a incerteza da estimativa. A simplificação do modelo, com a consideração de uma atmosfera homogênea e a omissão de fatores como topografia e presença de nuvens, implica em resultados menos precisos, especialmente em áreas com baixa umidade atmosférica. A calibração com dados locais pode minimizar essa incerteza, mas a variabilidade espacial e temporal do clima ainda impacta a precisão das estimativas. A qualidade e a disponibilidade dos dados de entrada também impactam a incerteza. Em regiões semiáridas, a escassez de estações meteorológicas e a falta

de dados contínuos e confiáveis podem gerar *vieses* nas estimativas da água precipitável. A falta de dados históricos limita a análise de tendências e a capacidade de previsão, aumentando a incerteza em relação às projeções futuras. Para minimizar as incertezas e aumentar a confiabilidade das estimativas, é fundamental integrar diferentes abordagens e fontes de informação. A combinação de dados de satélite, modelos numéricos mais complexos e observações locais, além da análise estatística de séries temporais, pode contribuir para uma visão mais completa e precisa da água precipitável em regiões semiáridas. É importante reconhecer as limitações intrínsecas da pesquisa e do modelo de Harrison, mas também explorar seus potenciais, buscando aprimorar a coleta de dados, a calibração do modelo e a integração de diferentes métodos para alcançar estimativas mais precisas e confiáveis. Essa busca constante pela redução da incerteza é fundamental para a gestão eficiente dos recursos hídricos e o desenvolvimento sustentável de regiões semiáridas.

### **4.3 Curva de permanência da água precipitável sob três condições climáticas**

A curva de permanência da água precipitável na troposfera é uma representação gráfica que descreve a distribuição estatística da quantidade de água precipitável em uma determinada região ao longo do tempo. Esta curva é uma ferramenta importante na meteorologia, na hidrologia e na climatologia para entender a disponibilidade de água na atmosfera e sua variabilidade temporal. Ao analisar uma curva de permanência da água precipitável, é possível identificar tendências sazonais, anomalias climáticas, padrões de precipitação e características regionais da atmosfera. A curva de permanência da água precipitável é uma ferramenta útil para entender o ciclo hidrológico e as interações entre a atmosfera e a superfície da Terra, sendo amplamente utilizada em estudos climáticos e hidrológicos, previsões meteorológicas e avaliações de risco relacionadas à precipitação. Observa-se na (Figura 12) perfis de permanência da água precipitável sob três diferentes condições climáticas, litoral, serra e sertão.

Figura 12 – Curva de permanência da água precipitável na atmosfera sob três condições climáticas



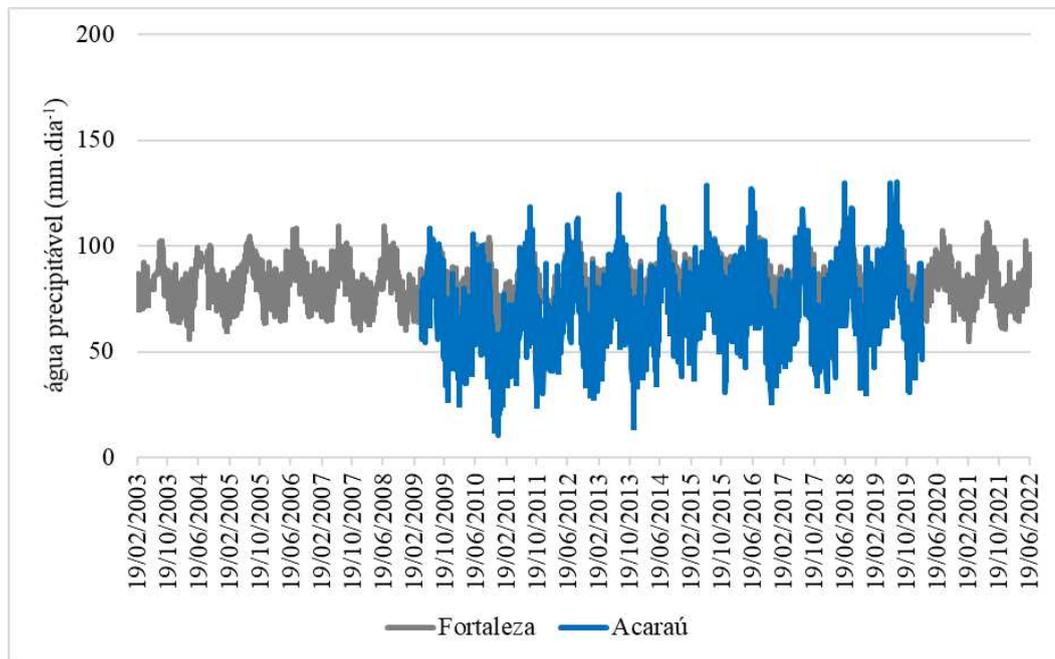
Fonte: Autor (2024)

#### 4.4 Modelagem da água precipitável na baixa troposfera

Compreender a distribuição e a variabilidade da água precipitável na baixa troposfera que corresponde à faixa da superfície do solo até 1,5 km de altura é essencial, pois essa camada da atmosfera é onde ocorre a maior parte da dinâmica meteorológica que influencia diretamente a precipitação e a disponibilidade hídrica, que ajuda a prever eventos extremos, como secas e chuvas intensas, que são comuns no semiárido cearense. O estudo dessa camada atmosférica com alta dinâmica é vital para promover a resiliência e a sustentabilidade no semiárido cearense. O estudo da água precipitável, iniciou-se com a aplicação do modelo desenvolvido por Harrison (1995) utilizando-se dados correspondentes a uma referência bária de 1013 hPa e uma referência bária de 850 hPa (~1,5 km de altitude), para validar informações provenientes de estações meteorológicas. Isso permitiu uma comparação direta entre as medições de água precipitável em diferentes níveis atmosféricos, especificamente entre 1013 hPa e 850 hPa. Essa abordagem proporcionou uma base sólida para avaliar a distribuição vertical da precipitação e aprimorar a precisão do modelo meteorológico, contribuindo para uma compreensão mais abrangente dos processos atmosféricos e climáticos.

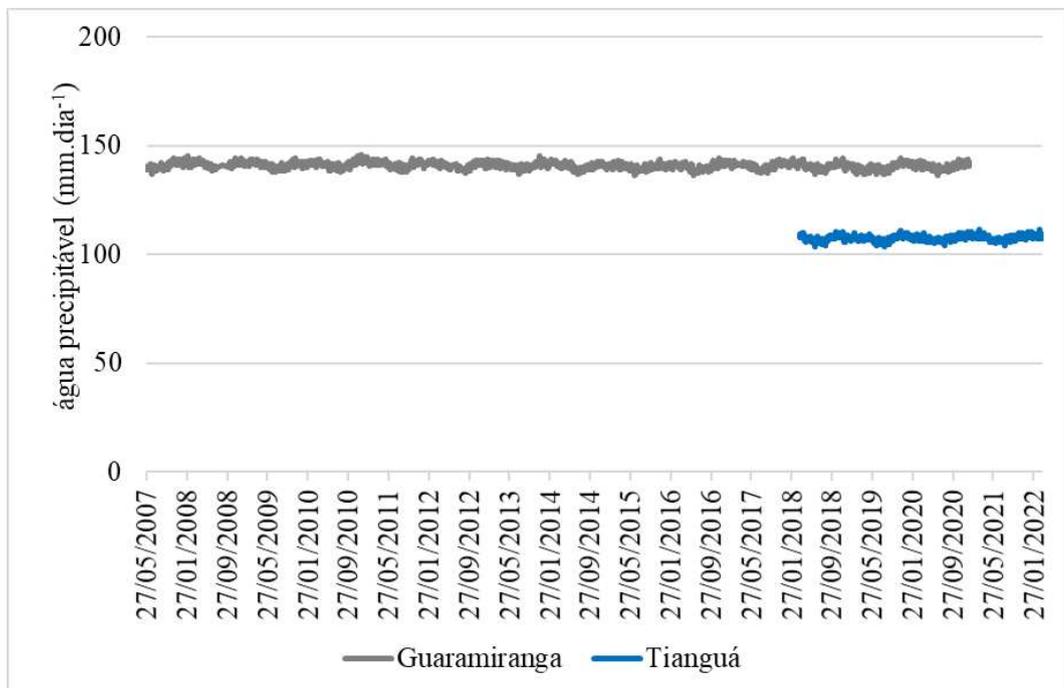
Observa-se o comportamento da água precipitável na baixa troposfera, em Acaraú e Fortaleza - litoral (Figura 13), Guaramiranga e Tianguá - serra (Figura 14) e Morada Nova e Crateús - sertão (Figura 15).

Figura 13 – Água precipitável na baixa troposfera sob as condições climáticas do litoral para os municípios de Acaraú e Fortaleza



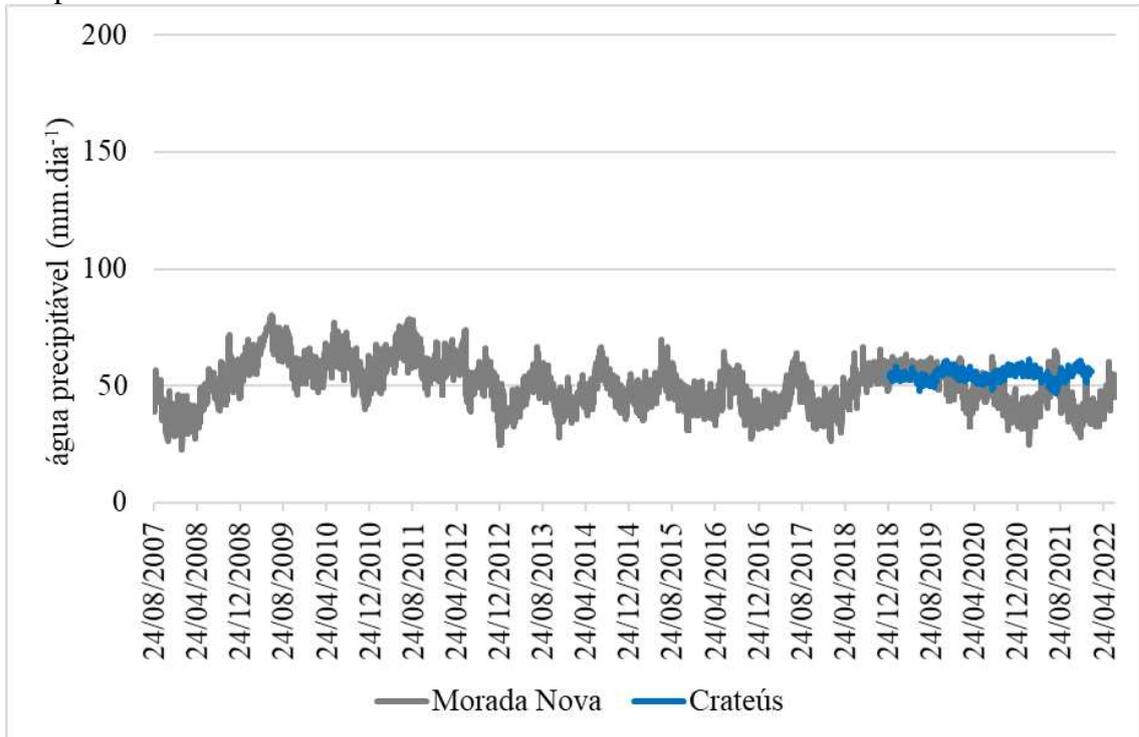
Fonte: Autor (2024)

Figura 14 – Água precipitável na baixa troposfera sob as condições climáticas da serra para os municípios de Guaramiranga e Tianguá



Fonte: Autor (2024)

Figura 15 – Água precipitável na baixa troposfera sob as condições climáticas do sertão para os municípios de Morada Nova e Crateús



Fonte: Autor (2024)

Foram realizados cálculos para determinar a distribuição de água precipitável em uma faixa específica de 1,5 km a partir do solo, considerando esta faixa como baixa troposfera. Sob condições climáticas de litoral, em Fortaleza a água precipitável demonstra uma maior variabilidade, com picos de valores em períodos específicos do ano, indicando uma influência direta da sazonalidade climática. Entre fevereiro e maio, os valores tendem a ser mais altos, refletindo a maior umidade atmosférica durante a estação chuvosa. Já nos meses de junho a dezembro, a água precipitável diminui, seguindo a tendência de menor umidade durante a estação seca. Acaraú, por sua vez, apresenta uma tendência menos pronunciada de variação sazonal, com valores de água precipitável mais estáveis ao longo do ano. Apesar dessa relativa constância, podemos observar flutuações em períodos específicos, possivelmente relacionadas a eventos climáticos particulares.

A localização de ambas as cidades no litoral cearense, em contato direto com o Oceano Atlântico, influencia diretamente a umidade atmosférica e, consequentemente, os padrões de água precipitável. A proximidade com o mar contribui para uma maior umidade, especialmente durante a estação chuvosa, quando o oceano atua como fonte de vapor de água.

Sob condições climáticas de serra, em Guaramiranga a água precipitável demonstra uma maior variabilidade, com picos de valores em períodos específicos do ano. Essa variação

é provavelmente influenciada pela topografia da região serrana, que pode gerar efeitos orográficos, como o aumento da precipitação e da umidade em áreas de maior altitude. Os dados de Tianguá, também localizada em uma região serrana, indicam uma tendência mais estável na água precipitável, com flutuações menos pronunciadas ao longo do ano. Comparando-se os dados de Guaramiranga e Tianguá, observamos que a água precipitável em Guaramiranga tende a ser mais elevada, provavelmente devido à influência da topografia montanhosa e à presença de áreas de vegetação nativa, que contribuem para a retenção de umidade. Em Tianguá, a umidade atmosférica pode ser influenciada por outros fatores, como atividades agropastoris e algumas indústrias.

Sob condições climáticas de sertão, em Crateús, a água precipitável demonstra uma variação sazonal mais pronunciada, com picos de valores em períodos específicos do ano, refletindo diretamente o regime de chuvas do sertão cearense. Os valores tendem a aumentar durante a estação chuvosa, geralmente entre janeiro e maio, e diminuem durante a estação seca, que se estende de julho a dezembro. Essa sazonalidade é típica da região, com chuvas concentradas em um período específico do ano, e longos períodos de estiagem. Os dados de Morada Nova também indicam uma variação sazonal na água precipitável, porém menos pronunciada do que em Crateús. A água precipitável aumenta durante a estação chuvosa, de fevereiro a maio, e diminui durante a estação seca, de junho a dezembro. Essa menor amplitude nas variações pode ser explicada por fatores como a influência de outros tipos de vegetação, como a caatinga, que pode contribuir para a retenção de umidade.

A localização de ambas as regiões no sertão do Ceará, caracterizado por um clima semiárido com chuvas escassas e irregulares, impacta diretamente os padrões de água precipitável. A baixa umidade atmosférica e os longos períodos de estiagem são características marcantes da região, o que se reflete nos dados de água precipitável.

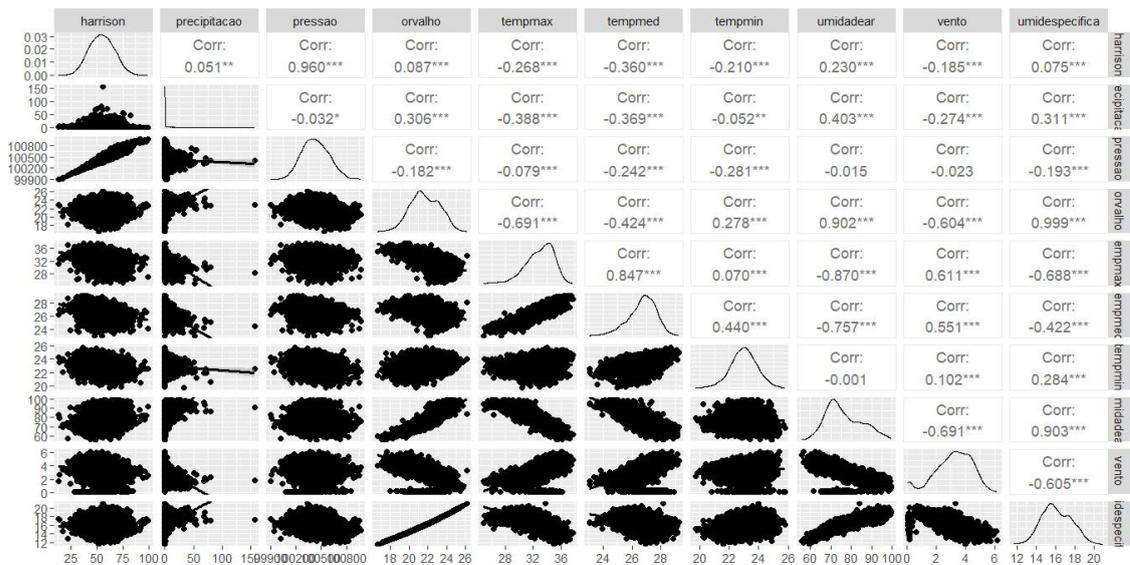
O pastoreio excessivo, pelo pisoteio do gado, compacta o solo, tornando-o impermeável e dificultando a infiltração da água da chuva. Essa água, que antes alimentaria os aquíferos e manteria o lençol freático, escoava superficialmente, perdida para rios e evaporando rapidamente. A derrubada da vegetação nativa para a criação de pastagens agrava o problema. A terra fica desprotegida, propensa à erosão, intensificando a perda de água e nutrientes. Além disso, a ausência de vegetação aumenta a temperatura do solo, alterando os padrões de chuva e diminuindo a quantidade de água precipitável na região. A redução da cobertura vegetal também impacta o ciclo hidrológico local, diminuindo a evapotranspiração e, conseqüentemente, a precipitação.

### 4.5 Avaliação dinâmica sazonal da água precipitável sob três diferentes condições climáticas no estado do Ceará

Para investigar a quantidade de água precipitável no Ceará, foi realizado um estudo estatístico abrangendo seis estações pluviométricas, estrategicamente escolhidas para representar as diferentes regiões climáticas do estado. O estudo incluiu duas estações no litoral, Acaraú e Fortaleza, representando o clima litorâneo. Duas estações na serra, Guaramiranga e Tianguá, foram selecionadas para representar o clima de serra. Por fim, duas estações no sertão, Crateús e Morada Nova, foram incluídas para abranger o clima de sertão.

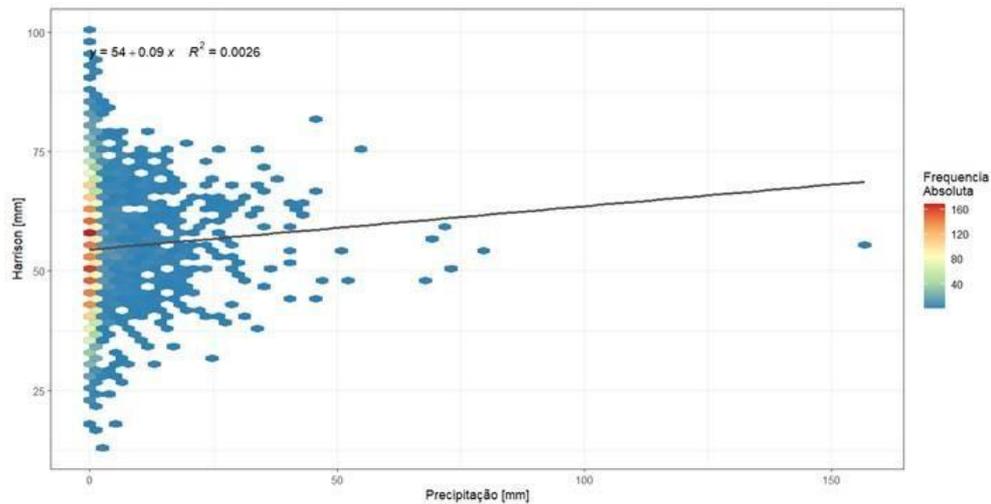
A análise das variáveis climáticas é apresentada em um conjunto de Figuras (16 a 33), divididas em três categorias para cada localidade: Acaraú (Figuras 16, 17 e 18), Guaramiranga (Figuras 19, 20 e 21), Crateús (Figuras 22, 23 e 24), Fortaleza (Figuras 25, 26 e 27), Tianguá (Figuras 28, 29 e 30) e Morada Nova (Figuras 31, 32 e 33). Cada conjunto de três figuras representa, respectivamente, a matriz de correlação de *Pearson* para as variáveis climáticas, a relação linear entre a água precipitável e a densidade de eventos de precipitação para as condições climáticas analisadas, e a densidade temporal da distribuição da água precipitável, respectivamente. Essa estrutura facilita a compreensão da análise e permite uma comparação direta entre as diferentes categorias de dados para cada localidade.

Figura 16 – Matriz de correlação de *Pearson* para variáveis climáticas em Acaraú



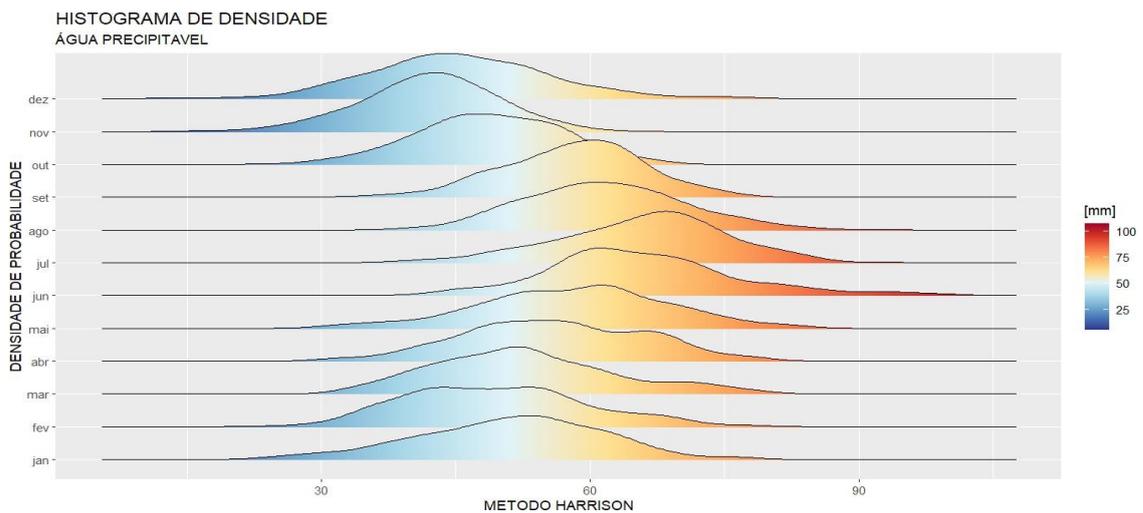
Fonte: Autor (2024)

Figura 17 – Relação linear da água precipitável e densidade de eventos de precipitação para as condições climáticas do litoral em Acaraú



Fonte: Autor (2024)

Figura 18 – Densidade temporal da distribuição da água precipitável em Acaraú



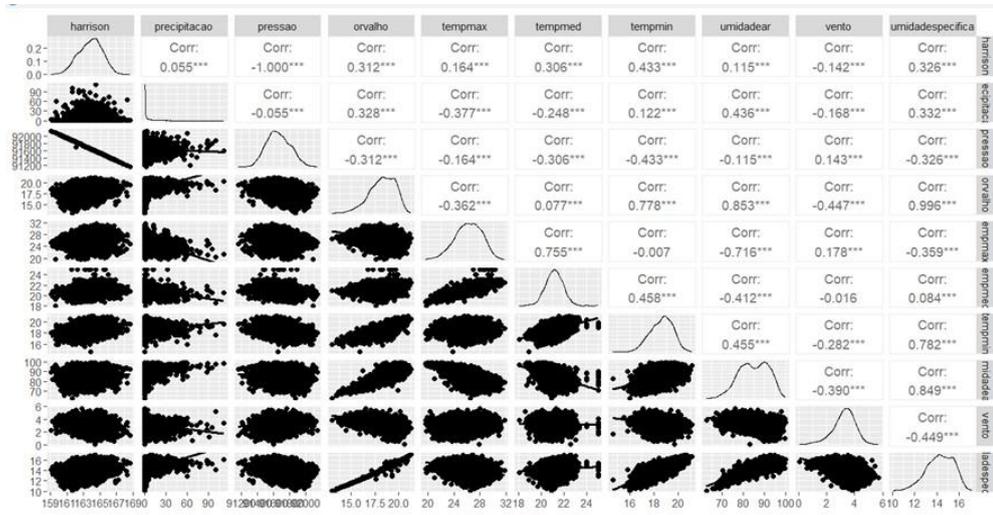
Fonte: Autor (2024)

Para Acaraú, as variáveis que apresentaram maior correlação com a água precipitável média diária calculada mediante a modelagem proposta por Harrison são: precipitação, pressão atmosférica, temperatura do ponto de orvalho, umidade do ar e umidade específica. O teste de tendência de *Mann-Kendall* obteve como resposta um valor de  $Z$  de 13,581,  $n=3955$  e um  $p$ -value menor que  $2.2e-16$ , além de um  $\tau$  de 0,144. O  $\tau$  evidencia uma tendência temporal crescente. Na (Figura 17), apresenta o resultado do teste de tendência ascendente. Através da (Figura 18), pode-se observar os momentos do ano em que ocorrem níveis mais elevados e mais baixos de água precipitável.

Para Guarimiranga, as variáveis que apresentaram maior correlação com o método Harrison, foi a precipitação, pressão atmosférica, temperatura do ponto de

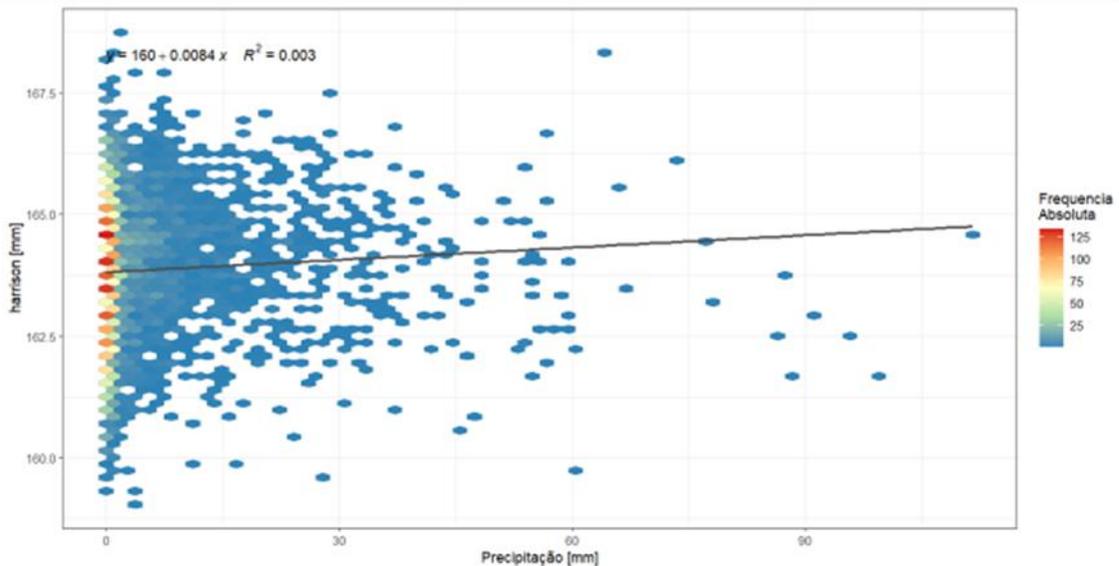
orvalho, temperatura máxima, temperatura média, temperatura mínima, umidade relativa do ar e umidade específica. O teste de tendência, indica que há uma tendência decrescente dos dados, muitas observações e uma rejeição da hipótese nula (de não-tendência dos dados), como pode-se inferir de um  $Z=-13,076$  e um tau de  $-0,131$ . Observa-se na (Figura 20) o resultado que o teste de tendência crescente é validado. Através da (Figura 21), podemos observar os momentos do ano em que ocorrem níveis mais elevados e mais baixos de água precipitável.

Figura 19 – Matriz de correlação de *Pearson* para variáveis climáticas em Guaramiranga



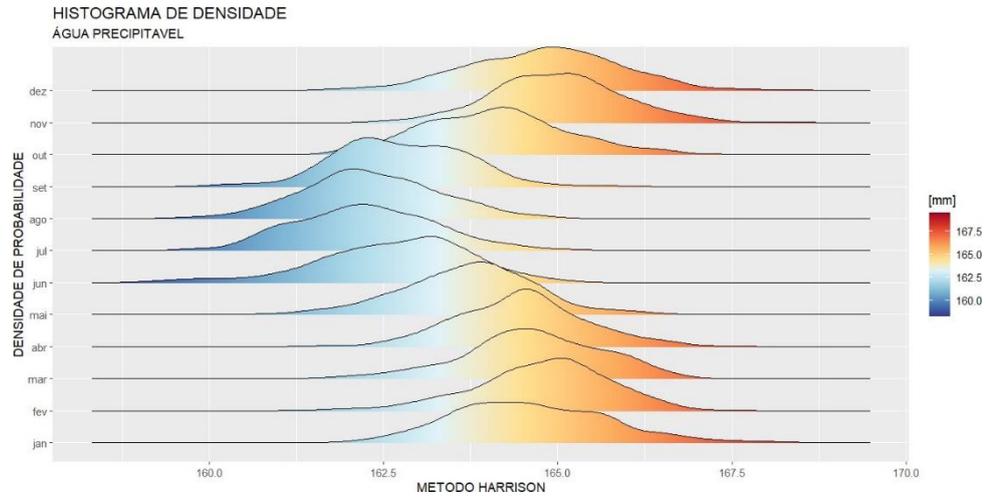
Fonte: Autor (2024)

Figura 20 – Relação linear da água precipitável e densidade de eventos de precipitação para as condições climáticas da serra em Guaramiranga



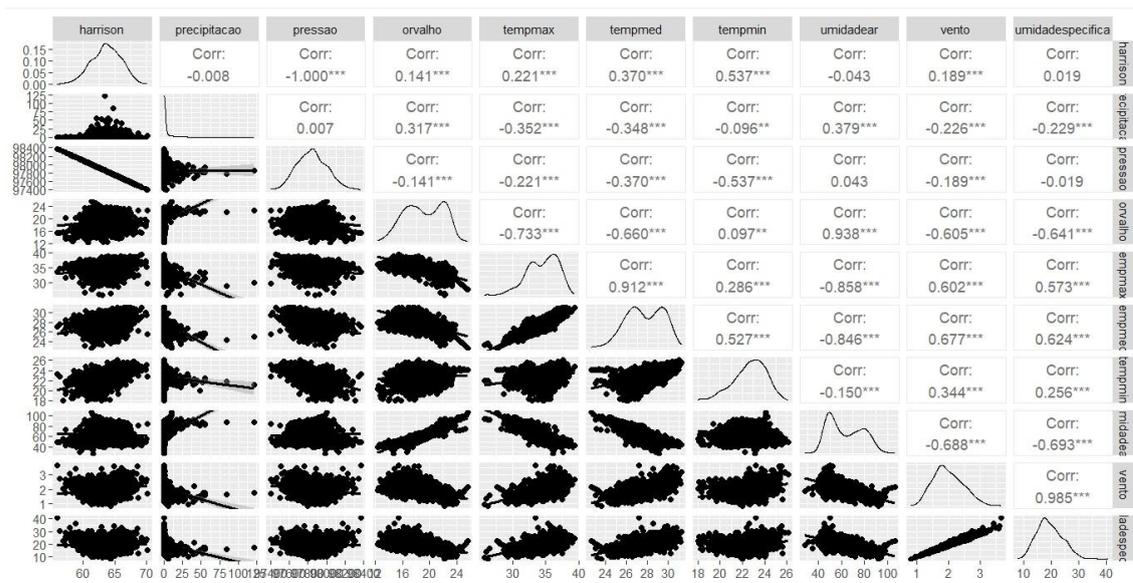
Fonte: Autor (2024)

Figura 21 – Densidade temporal da distribuição da água precipitável em Guaramiranga



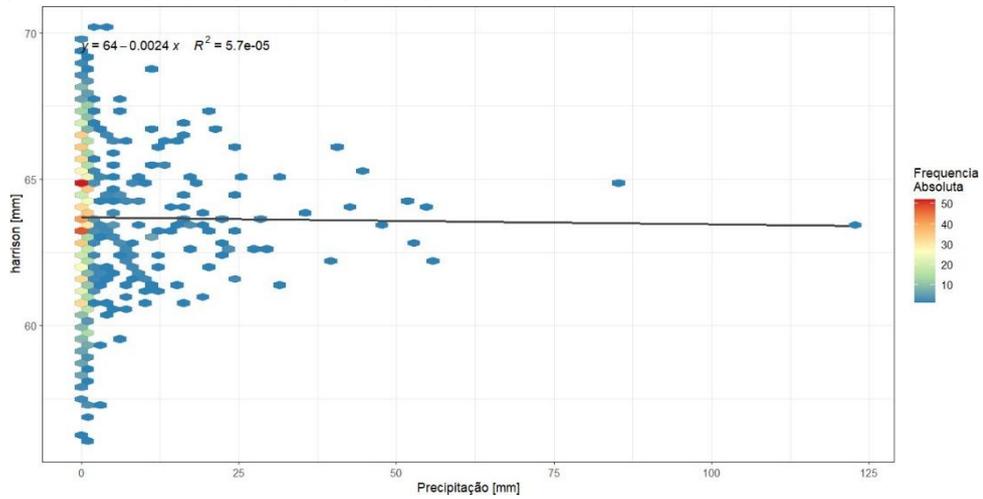
Fonte: Autor (2024)

Figura 22 – Matriz de correlação de *Pearson* para variáveis climáticas em Crateús



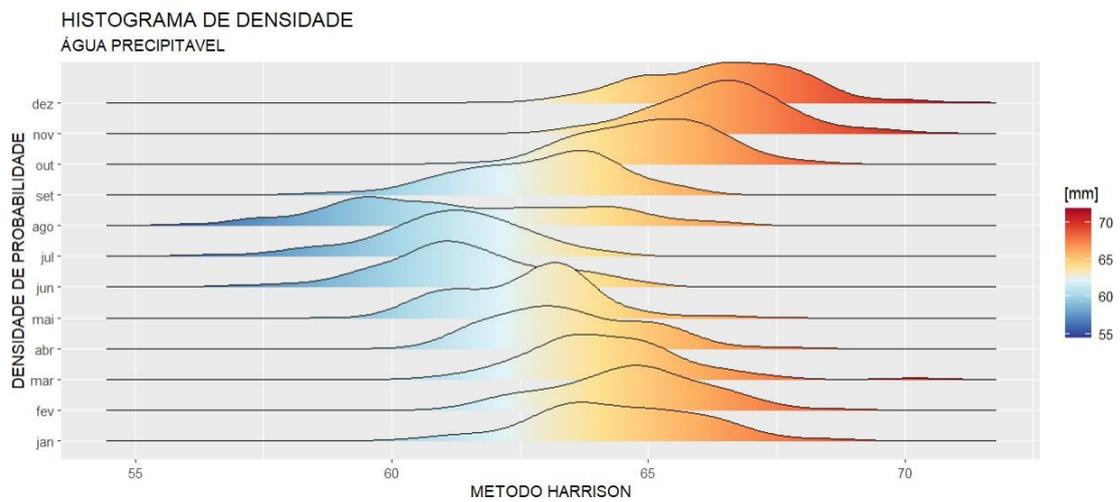
Fonte: Autor (2024)

Figura 23 – Relação linear da água precipitável e densidade de eventos de precipitação para as condições climáticas do litoral em Crateús



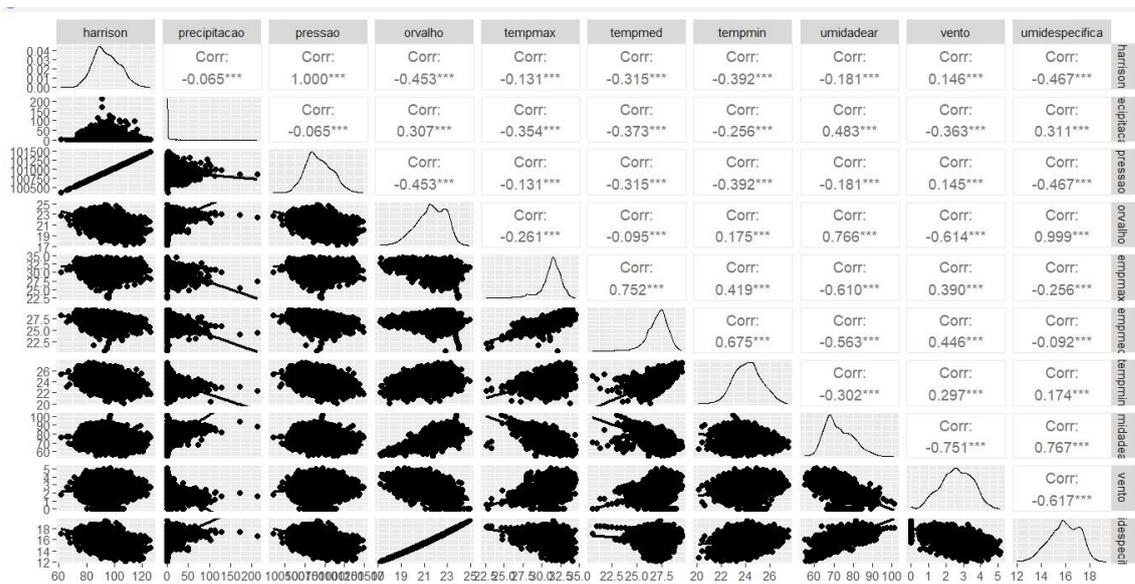
Fonte: Autor (2024)

Figura 24 – Densidade temporal da distribuição da água precipitável em Crateús



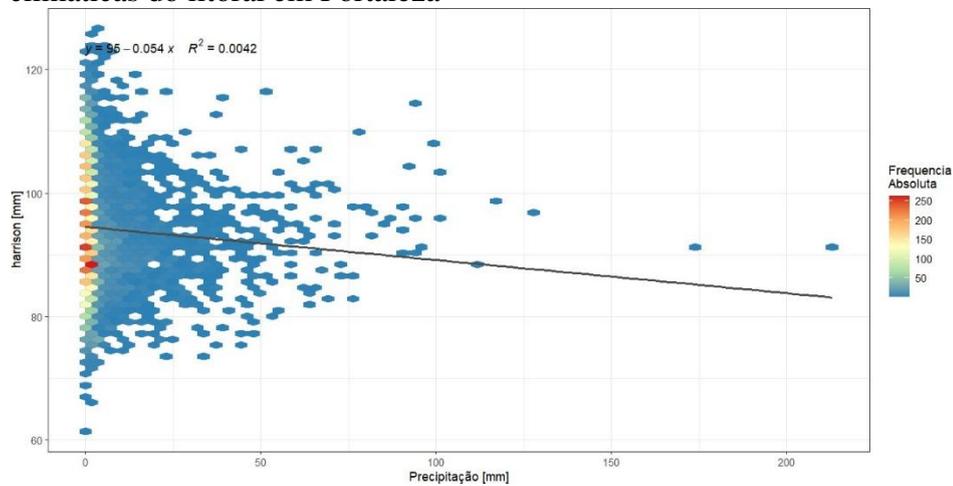
Fonte: Autor (2024)

Figura 25 – Matriz de correlação de *Pearson* para variáveis climáticas em Fortaleza



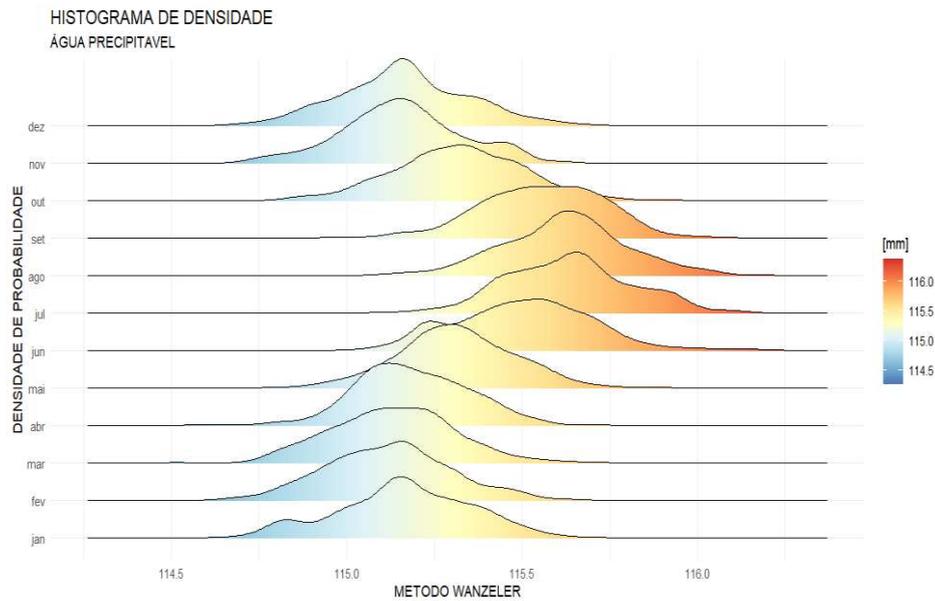
Fonte: Autor (2024)

Figura 26 – Relação linear da água precipitável e densidade de eventos de precipitação para as condições climáticas do litoral em Fortaleza



Fonte: Autor (2024)

Figura 27 – Densidade temporal da distribuição da água precipitável em Fortaleza

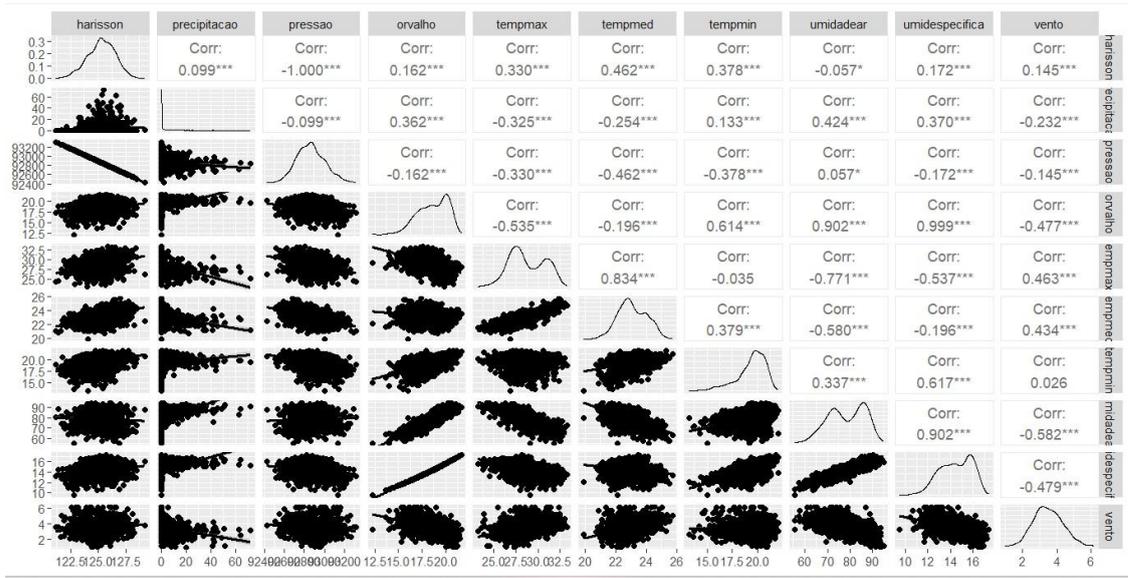


Fonte: Autor (2024)

Para Crateús, as variáveis que apresentaram maior correlação com a água precipitável pelo método Harrison, foram a temperatura do ponto de orvalho, temperatura máxima, temperatura média, temperatura mínima, vento e umidade específica. O teste de *Mann-Kendall* evidência uma tendência significativa entre os valores esperados e medidos e o valor de  $\tau$  (0.141) indica uma tendência de aumento ao longo do tempo. Na (Figura 23), apresenta o resultado do teste de tendência de regularidade é validado. Através (Figura 24), pode-se observar os momentos do ano em que ocorrem níveis mais elevados e mais baixos de água precipitável.

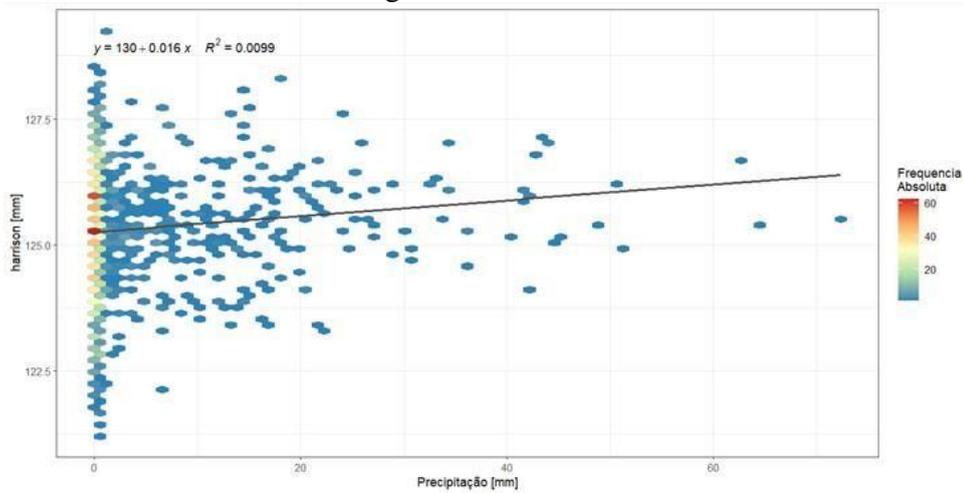
Para Fortaleza, as variáveis que apresentaram maior correlação com a água precipitável pelo método Harrison, foi, pressão atmosférica e a velocidade dos ventos. Pelo fato de, no teste de tendência, o parâmetro Z igual a 5,29 indica uma tendência de aumento, significativo a 1% e ascendente. Na (Figura 26), apresenta o resultado do teste de tendência decrescente é validado. Através da (Figura 27), pode-se observar os momentos do ano em que ocorrem níveis mais elevados e mais baixos de água precipitável.

Figura 28 – Matriz de correlação de *Pearson* para variáveis climáticas em Tianguá



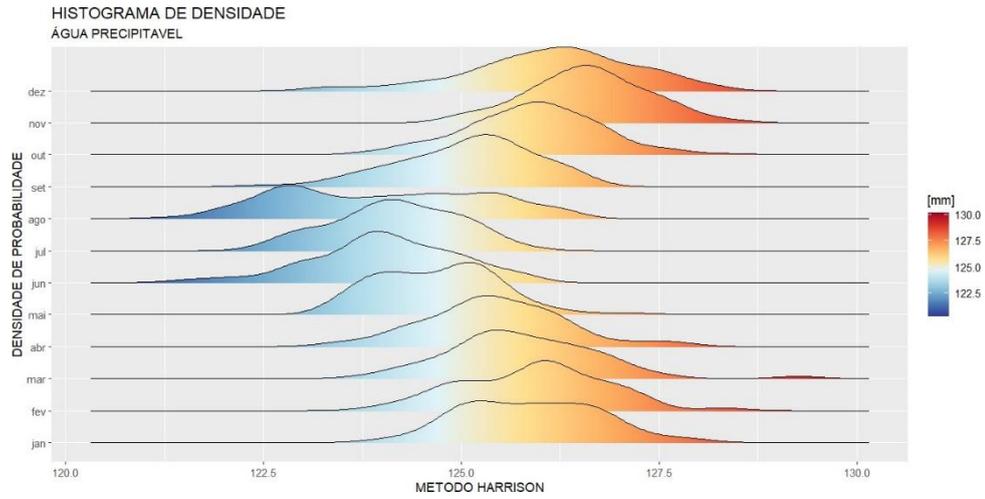
Fonte: Autor (2024)

Figura 29 – Relação linear da água precipitável e densidade de eventos de precipitação para as condições climáticas do litoral em Tianguá



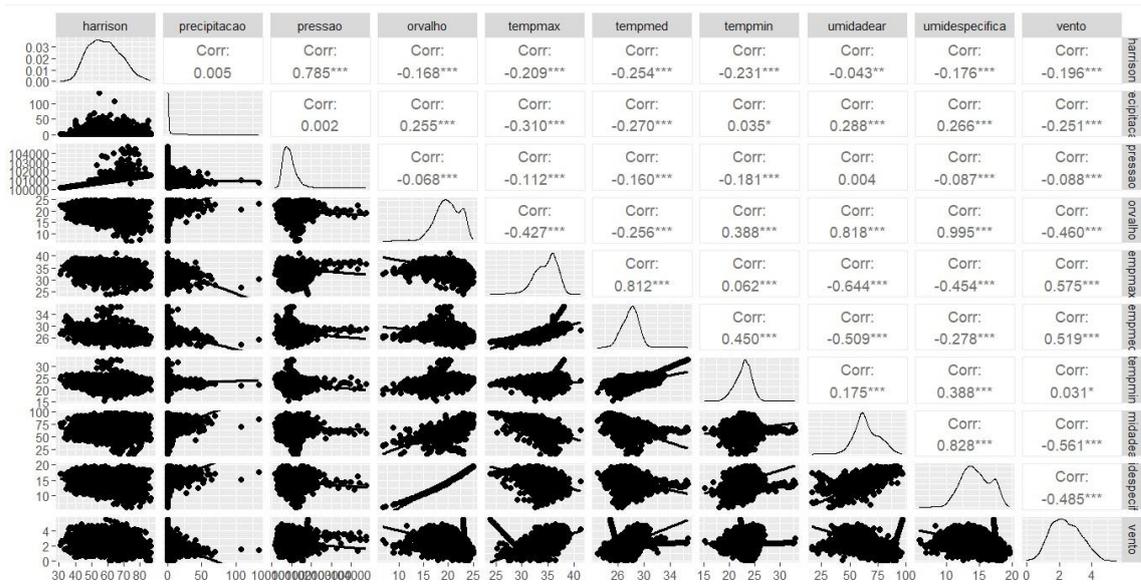
Fonte: Autor (2024)

Figura 30 – Densidade temporal da distribuição da água precipitável em Tianguá



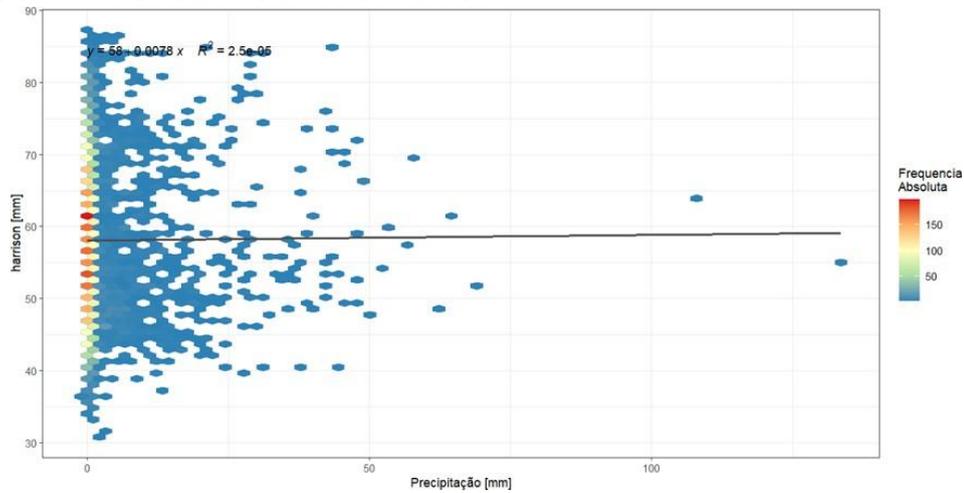
Fonte: Autor (2024)

Figura 31– Matriz de correlação de *Pearson* para variáveis climáticas em Morada Nova



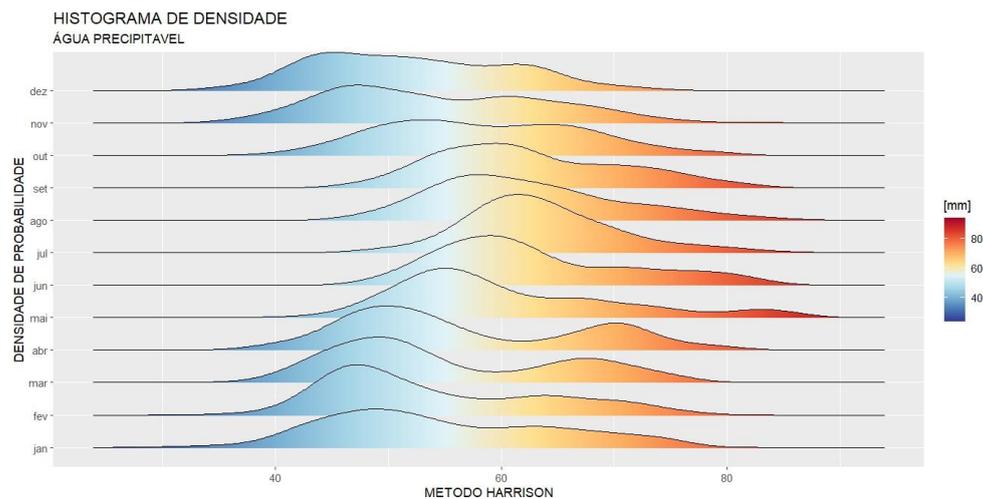
Fonte: Autor (2024)

Figura 32 – Relação linear da água precipitável e densidade de eventos de precipitação para as condições climáticas do sertão em Morada Nova



Fonte: Autor (2024)

Figura 33 – Densidade temporal da distribuição da água precipitável em Morada Nova



Fonte: Autor (2024)

Para Tianguá, as variáveis que apresentaram maior correlação com a água precipitável pelo método Harrison, foi a precipitação, temperatura do ponto de orvalho, temperatura (máxima, média e mínima), umidade específica e a velocidade dos ventos. O teste de *Mann-Kendall* obteve valores de  $Z$  de 7,344 com um baixo  $p$ -value e um  $\tau$  de 0,128. De tais resultados pode-se inferir que há uma tendência de crescimento/ascendente nos dados.

Para Morada Nova, as variáveis que apresentaram maior correlação com a água precipitável pelo método Harrison, são a precipitação e a pressão atmosférica. Mediante o teste de *Mann-Kendall*, uma tendência estatística significativa ( $p$ -value de  $2,2e-16$ ) e de forma decrescente ( $Z=-21,569$ ) havendo uma grande diferença entre os valores observados e esperados. O teste propõe uma tendência fraca ( $\tau = -0,195$ ) decrescente.

Tabela 3 – Resumo estatístico das variáveis climáticas por região no Estado do Ceará

	LITORAL		SERRA		SERTÃO	
	Acaraú	Fortaleza	Guaramiranga	Tianguá	Crateús	Morada Nova
Precipitação (mm/ano)	1067,3	1413,3	1556,5	1185,2	673,3	660,3
Evapotranspiração (mm/ano)	1720,6	1628,2	1384,2	1848,7	2005,1	1942,1
Pressão Atmosférica (Pa)	91662	100924	91662	92864	97843	100909
Temp. Orvalho (°C)	18,3	21,6	18,3	18,7	19,2	19,9
Temp. Máxima (°C)	27,3	31,3	27,3	28,8	34,6	34,6
Temp. Média (°C)	21,6	27,3	21,6	23,1	27,7	27,9
Temp. Mínima (°C)	18,7	24,2	18,7	19,4	22,6	22,8
Umidade do Ar (%)	85,4	71,8	85,4	78,4	63,4	64,9
Umidade Específica (g/kg)	14,3	15,9	14,3	14,5	14,3	14,5
Vento (m/s)	3,3	1,9	3,3	3,5	2,0	2,4
Altitude (m)	67,2	29,6	865,5	756,0	298,0	45,0
Água Precipitável (mm/ano)	29346,0	34419,5	59787,0	45734,5	23250,5	21973,0

Fonte: Adaptado da FUNCEME (2024)

Observa-se na (Tabela 3) um resumo estatístico das principais variáveis climáticas em seis municípios representativos do Ceará, divididos em três regiões: litoral, serra e sertão. As informações revelam diferenças significativas entre as regiões, influenciadas por fatores como altitude, latitude e proximidade do Oceano Atlântico. A precipitação é maior no litoral e na serra, com valores acima de 1000 mm/ano, enquanto o sertão apresenta valores mais baixos, inferiores a 700 mm/ano. A evapotranspiração é maior no sertão, devido às altas temperaturas e à maior radiação solar. A serra, com altitudes maiores e temperaturas mais amenas, apresenta menor evapotranspiração. As temperaturas médias são mais elevadas no sertão, seguidas do litoral e da serra, com influência da altitude e da latitude. A umidade do ar e a umidade específica são maiores no litoral e na serra, devido à proximidade do oceano e à maior precipitação. A pressão atmosférica é maior no sertão, em função da menor altitude. A velocidade média do vento é maior no litoral e na serra, possivelmente influenciada pela orografia e pelas correntes marítimas. A Tabela 3 demonstra a diversidade climática do Ceará, com diferenças marcantes entre as regiões, considerando a variabilidade espacial e temporal das variáveis climáticas, a influência de outros fatores climáticos, e o impacto das mudanças climáticas. É importante lembrar que a Tabela 3 apresenta apenas dados médios.

#### **4.6 Dinâmica da água precipitável de acordo com as condições climáticas**

É essencial compreender as características climáticas, hidrológicas e geográficas de cada região, bem como as relações entre as variáveis apresentadas. Os três diferentes tipos de regiões no estado, o litoral, a serra e o sertão, representadas por seis localidades distintas, teve como análise as seguintes variáveis: A serra tem a maior precipitação média anual (1556,5 mm), seguida pelo litoral (1413,3 mm) e, por último, o sertão (com a menor média de 673,3 mm). Esses valores são consistentes com as características climáticas esperadas de cada região, já que áreas montanhosas tendem a receber mais chuvas do que planícies e áreas de baixa altitude. O sertão tem a evapotranspiração mais alta (2005,1 mm/ano), seguido pela serra (1848,7 mm/ano) e o litoral (1720,6 mm/ano). Isso sugere que, apesar da menor precipitação, o sertão tem uma alta taxa de perda de água devido à evaporação, o que contribui para suas condições áridas. As variações na pressão atmosférica não são tão significativas entre as regiões, mas é interessante notar que a serra tem uma pressão ligeiramente mais baixa em comparação com as outras duas regiões. A serra apresenta as temperaturas mais baixas em média, tanto máxima quanto mínima, enquanto o sertão tem as mais altas. Isso está de acordo com a influência da altitude e latitude sobre as temperaturas, sendo que áreas mais elevadas tendem a ser mais frias. O litoral tem a umidade do ar mais elevada, o que é esperado para regiões próximas ao oceano. No entanto, a umidade específica é mais alta na serra, o que sugere que, apesar da menor umidade relativa do ar, a quantidade absoluta de água na atmosfera poder ser maior nessa região devido às baixas temperaturas. O litoral e a serra têm velocidades médias de vento mais altas em comparação com o sertão, o que pode ser influenciado pela topografia e pela influência das massas de ar. A serra apresenta a maior altitude entre as regiões mencionadas, seguida pelo sertão e, por último, o litoral. Isso influencia diretamente nas características climáticas e nas variações de temperatura entre as regiões.

#### **4.7 Análise de correlações entre parâmetros climáticos**

O modelo de Harrison para a água precipitável se baseia na relação entre a umidade específica e a pressão atmosférica. Embora a temperatura não seja uma variável direta na fórmula, ela influencia a água precipitável indiretamente, pois afeta a umidade do ar, pois temperaturas mais altas permitem que o ar contenha mais vapor de água.

Para a variável precipitação, observa-se que as correlações são predominantemente muito fracas em todas as localidades, variando de 0,051 a -0,065, indicando uma relação pouco significativa com as outras variáveis meteorológicas. Por outro lado, a pressão atmosférica mostra correlações mais fortes e coerentes com os locais específicos: uma forte correlação positiva (0,960 a 1) com a variável do próprio local em todas as regiões, sugerindo uma relação consistente entre a pressão atmosférica e as condições locais. As variáveis relacionadas à temperatura (temperatura do ponto de orvalho, temperatura máxima, temperatura média e temperatura mínima) exibem correlações variadas, com algumas tendências consistentes. Por exemplo, a temperatura máxima e a temperatura média mostram uma correlação positiva moderada a forte com as localidades da serra e do sertão, enquanto a temperatura mínima exibe correlações similares com as regiões do sertão, mas correlações negativas com as localidades da serra. As variáveis de umidade do ar e umidade específica apresentam correlações mistas, variando de moderadamente positivas a moderadamente negativas, indicando uma relação complexa com as outras variáveis e uma dependência significativa das condições locais. Por fim, a velocidade do vento exibe correlações predominantemente fracas, sugerindo que esta variável pode ser menos influente nas condições meteorológicas das regiões consideradas neste modelo.

Tabela 4 – Correlação entre as variáveis climáticas por região no Ceará (Continua)

	Litoral		Serra		Sertão	
	Acaraú	Fortaleza	Guaramiranga	Tianguá	Crateús	Morada Nova
<b>Precipitação</b>	<b>0,051</b>	<b>-0,065</b>	<b>0,055</b>	<b>0,099</b>	<b>-0,008</b>	<b>0,005</b>
<b>Pressão atmosférica</b>	<b>0,960</b>	<b>1</b>	<b>-1</b>	<b>-1</b>	<b>-1</b>	<b>0,785</b>
<b>Temperatura do ponto de orvalho</b>	<b>0,087</b>	<b>-0,453</b>	<b>0,312</b>	<b>0,162</b>	<b>0,141</b>	<b>-0,168</b>
<b>Temperatura máxima</b>	<b>-0,268</b>	<b>-0,131</b>	<b>0,164</b>	<b>0,330</b>	<b>0,221</b>	<b>-0,209</b>
<b>Temperatura média</b>	<b>-0,360</b>	<b>-0,315</b>	<b>0,306</b>	<b>0,462</b>	<b>0,370</b>	<b>-0,254</b>
<b>Temperatura mínima</b>	<b>-0,210</b>	<b>-0,392</b>	<b>0,433</b>	<b>0,378</b>	<b>0,537</b>	<b>-0,231</b>
<b>Umidade do ar</b>	<b>0,230</b>	<b>-0,181</b>	<b>0,115</b>	<b>-0,057</b>	<b>-0,043</b>	<b>-0,043</b>
<b>Umidade específica</b>	<b>0,050</b>	<b>-0,467</b>	<b>0,326</b>	<b>0,172</b>	<b>0,019</b>	<b>-0,176</b>
<b>Velocidade do vento</b>	<b>-0,185</b>	<b>0,146</b>	<b>-0,142</b>	<b>0,145</b>	<b>0,189</b>	<b>-0,196</b>

Fonte: Autor (2024)

## 5 CONCLUSÕES

A pesquisa se debruçou sobre a análise das variações sazonais, a influência dos fatores meteorológicos e as tendências observadas, utilizando dados coletados de 17 estações meteorológicas automáticas no período de 2003 a 2022. A análise dos dados, está coerente com a disponibilidade de informações completas para cada estação considerando dados médios diários. Foi possível a construção de um panorama abrangente da distribuição da água precipitável no Ceará. Essa abordagem permitiu explorar a variabilidade temporal da água precipitável.

A análise dos dados revelou padrões distintos de distribuição da água precipitável no Ceará, com a zona serrana apresentando os maiores valores, impulsionados pela pressão atmosférica, temperatura do ponto de orvalho e umidade relativa do ar. O litoral, por sua vez, apresenta valores intermediários, sob influência da umidade marítima, enquanto o sertão, caracterizado por temperaturas elevadas e baixa umidade, exibe valores mais modestos.

A aplicação do modelo de Harrison para estimativa da água precipitável, apresentou utilidades importantes, como nas previsões meteorológicas, estudos climáticos e monitoramento de eventos extremos. A análise da umidade específica, por sua vez, revelou uma variação considerável, de quase o dobro, entre o valor máximo de 17,51 g/kg no outono em Acaraú e o mínimo de 9,18 g/kg na primavera em Aiuaba, evidenciando a diversidade climática e as complexas interações entre os fatores ambientais no Estado.

A investigação aprofundou a compreensão da dinâmica da água precipitável em diferentes cenários climáticos do Ceará, desvendando as variações sazonais e a influência dos fatores meteorológicos na sua distribuição. A análise da umidade específica, fundamental para a compreensão da água precipitável, permitiu identificar padrões de variação sazonal e espacial, fornecendo subsídios para a gestão de recursos hídricos e o desenvolvimento de políticas climáticas mais eficazes. Os resultados corroboram a importância da compreensão dos recursos hídricos atmosféricos e da dinâmica da água na baixa troposfera, contribuindo para uma visão mais abrangente do ciclo hidrológico no estado do Ceará. Para trabalhos futuros, recomenda-se a análise de um número maior de estações meteorológicas, aprimorando a interpolação e refinando os dados de umidade específica para uma espacialização mais precisa, aprofundando ainda mais a compreensão da dinâmica da água precipitável no Ceará.

## REFERÊNCIAS

- ABIODUN, B. J.; SALAMI, A. T.; BELLO, O. B. The effect of weather parameters on the formation of dew in a Nigerian environment. **Advances in Environmental Biology**, v. 4, n. 3, p. 432-438, 2010.
- ALLEN, Richard G.; PEREIRA, Luis S.; RAES, Dirk; SMITH, Martin. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements**. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, 1998.
- ALMEIDA, L. F.; CARVALHO, L. M. V.; SILVA, L. O. B. Impacto da incerteza na água precipitável na precisão dos modelos hidrológicos em bacias hidrográficas brasileiras. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 23, n. 1, p. 89-102, 2018.
- AMORIM, R. S. S.; SOUZA, J. L.; VILA, D. A. Influência do vento em superfície sobre a precipitação na bacia hidrográfica do rio Ipojuca. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 22, n. 2, p. 94-106, 2017.
- ANTUNES, F.; PEREIRA, L. S. Estimation of dew point temperature from minimum temperature and dew point depression in dry regions: Analysis of daily variation. **Journal of Hydrology**, v. 347, n. 1-2, p. 127-138, 2007.
- ARAGÃO, José Oribe Rocha de. O impacto do ENSO e do dipolo do atlântico no nordeste do Brasil. **Bull Inst. Fr. Études Andines**, v. 27, n. 3, p. 839-844, 1998.
- ARNOLD, B. C.; CASTILLO, E. **Regression With Linear Restrictions**. Springer Science & Business Media, 2008.
- BARBOSA, Henrique M. J. Vapor de água na atmosfera: do efeito estufa às mudanças climáticas. **Revista USP**, n. 103, p. 67-80, São Paulo, 2014.
- BEYSENS, D.; MILIMOUK, I.; NIKOLAYEV, V. S.; MUSELLI, M. Dew: A review of everything but water. **Journal of Adhesion Science and Technology**, v. 10, n. 11, p. 1239-1276, 1995.
- CABRAL, Danilo Ericksen Costa. **Análise da variabilidade espaço temporal da água precipitável na atmosfera utilizando dados do ERA - INTERIM/ECMWF**. 2018. 58f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal de Campina Grande, Pós-Graduação em Meteorologia, Campina Grande, 2018.
- CAVALCANTI, E. R. O semiárido face às mudanças climáticas. **Revista Coletiva**, Universidade Federal de Pernambuco, 2011.
- CERQUEIRA JÚNIOR, J. G.; FERNANDEZ, J. H.; HOELZEMANN, J. J.; LEME, N. M. P.; SOUSA, C. T. Estudo da variabilidade da coluna de água precipitável (PWC) no semiárido brasileiro por calibração de fotômetro solar. **Revista Holos**, v. 4, p. 298-316, 2014.
- CHOU, S. C.; BUSTAMANTE, M. M. C.; GOMES, J.; SILVA DIAS, P. L. Changes in the hydrological cycle of the Amazon Basin in the 21st century projections in the CoupledModel Intercomparison Project phase 5. **Climate Dynamics**, v. 38, n. 9-10, p. 2109-2125, 2012.

COUTINHO, J. R.; STEGANI, A. J. Estudo do orvalho em diferentes ambientes por meio de estações meteorológicas automáticas. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 11, n. 6, p. 2314-2328, 2018.

CUNHA, Fernando França da; MAGALHÃES, Fernando Fagner; CASTRO, Marco Aurélio de. Métodos para estimativa da evapotranspiração de referência para Chapadão do Sul - MS. **Revista Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 21, n. 2, mar.-abr., 2013.

DIAS, Anderson Alberto C.; ANDRADE-NETO, Antonio Vieira; MILITÃO, M. S. R.. **A Atmosfera Terrestre: Composição e Estrutura**. Departamento de Física, Universidade Estadual de Feira de Santana, 2007.

FREITAS, A. C. D.; SOUZA, M. P. D. Caracterização de séries temporais de precipitação utilizando histograma de densidade no sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 20, p. 171-188, 2017.

FREITAS, Rose Ane Pereira de; SOUZA, Ronald Buss; REIS, Rafael; LINDEMANN, Douglas. S. Relação entre o vapor d'Água atmosférico e a temperatura da superfície do mar sobre a região da confluência Brasil-Malvinas com base em dados coletados In Situ. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 5, 2019.

FORSBERG, R.; TSCHERNING, C. C. Gravity Field Modeling from Satellite-to-Satellite Tracking Data. *In*: FREEDEN, Willi; NASHED, M. Zuhair; SONAR, Thomas. **Handbook of Geomathematics**. Springer: Berlin, Heidelberg, 2018. p. 809-830.

GAO, C. Field experiments on the collection of atmospheric water with fog fences and dew condensers in Northwest China. **Water**, v. 10, n. 10, p. 1364, 2018.

GARCÍA; SÁNCHEZ-SESMA; RAMOS-MARTÍNEZ. Air density effects on attenuation, phase velocity and energy flux in seismic waves. **Geophysical Journal International**, 2003.

HASTENRATH, Stefan; HELLER, Leon. Dynamics of climatic hazards in northeast Brazil. **Quartely Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 103, n. 435, p.77-92, 1977.

HARRISON, R. G. A comparison of methods of estimating atmospheric moisture turnover. **Journal of Climate**, v. 8, n. 10, p. 2577-2581, 1995.

HEO, Jun-Hyung; RYU, Geun-Hyeok; JANG, Jae-Dong. Optimal interpolation of precipitable water using low earth orbit and numerical weather prediction data. **Remote Sens.**, v. 10, n. 3, p. 436, 2018.

HOLTON, James R. **An Introduction to Dynamic Meteorology**. 4 ed. Elsevier: Academic Press, 2004.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/>. Acesso: 08 set. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). 2011. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/>. Acesso: 08 set. 2024.

KLEMM, O. A method for estimating the long-term collection potential of dew in desert environments. **Journal of Arid Environments**, v. 126, p. 76-84, 2016.

KUNKEL, Kenneth E.; KARL, Thomas R.; SQUIRES, Michael F.; YIN, Xungang; STEGALL, Steve T.; EASTERLING, David R. Precipitation extremes: Trends and Relationships with average precipitation and precipitable water in the contiguous United States. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 59, n. 1, p. 125-142, 2020.

LEANDRO, M. M.; SILVA, M. Air density variations and their effects on meteorological parameters. **Revista Brasileira de Geofísica**, 2007.

LEE, T. Review of dew water harvesting: Strategies for maximizing water yield and quality. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 101, p. 183-193, 2019.

LEVIZZANI, V.; BAUER, P.; TURK, F. J. The Precipitation Measurement Missions: An Overview. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 112, n. D6, 2007.

LI; YING; POTTER JR, G. L. The impact of atmospheric water vapor on surface temperature. **Journal of Climate**, v. 14, n. 19, 2001.

LIMA, J. S. Viabilidade técnica e econômica do aproveitamento do orvalho no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 23, n. e18, 2018.

LIMA, M. S.; SANTOS, A. S.; COSTA, R. F. Influência da incerteza da água precipitável na previsão do tempo e clima no Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 30, n. 3, p. 349-362, 2015.

MA, J.; HU, C.; YANG, J.; HU, H. Investigation of isotopic compositions and water sources of precipitation during a storm event in China. **Journal of Hydrology**, v. 586, n. 124989, 2020.

MAKARYNSKY, O. Factors influencing dew water yield: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 75, p. 927-941, 2017.

MAPBIOMAS BRASIL. 2022. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/>. Acesso em: 08 set. 2024.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M. Climate change in the semi-arid northeast Brazil: precipitation variability and trends. **Climate Research**, v. 30, n. 3, p. 269-279, 2005.

MENDES, D.; CARVALHO, L. M. V. Avaliação da sensibilidade da precipitação no Brasil à intensidade dos ventos de oeste. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 34, n. 2, p. 331-344, 2019.

MIRANDA, Rui Pedro da Silva. **Avaliação experimental da capacidade de produção de água a partir de ar atmosférico por intermédio da refrigeração por compressão de vapor**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletromecânica) - Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal, 2016.

MOURA, Antonio D.; SHUKLA, Jagadish. On the dynamics of droughts in northeast Brazil: Observations, theory and numerical experiments with a general circulation model. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 38, n. 12, p. 2653-2675, 1981.

MOURA, Magna Soelma Beserra de; SOBRINHO, José Espínola; SILVA, Thieres George Freire da; SOUZA, Werônica Meira de. Aspectos meteorológicos do semiárido brasileiro. In: XIMENES, L. F.; SILVA, M. S. L. da; BRITO, L. T. de L. (Ed). **Tecnologias de Convivência com o Semiárido Brasileiro**. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, 2019. cap. 2, p. 85-104.

NEVES, Danielson; ARAÚJO, Rayana; ARAVÉQUIA, José. Análise da água precipitável e dos fluxos de calor latente/sensível no início da estação chuvosa das regiões sudeste e centro-oeste do Brasil. **Revista Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 35, pp. 202-206, dez. 2013.

NOBRE, A. D. Aproveitamento do orvalho como alternativa hídrica no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 7, n. 5, p. 1234-1245, 2014.

NOBRE, C. A.; MARENGO, J. A. **Clima do Brasil: variabilidade e mudança climática**. Oficina de Textos, 2010.

NOBRE, Paulo; SHUKLA, J. Variations of sea surface temperature, wind stress, and rainfall over the tropical Atlantic and South America. **Journal of Climate**, v. 9, n. 10, p. 2464-2479, 1996.

OLIVEIRA, M. M. D. Estudo preliminar da obtenção de água a partir do orvalho. In: **Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, 2007.

ORGANIZAÇÃO METEOROLÓGICA MUNDIAL (OMM). Água Precipitável. Glossário Meteorológico, **Eumetcal**, 2015.

PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS (IPCC). 2014. **Alterações Climáticas**. Impactos, Adaptação e Vulnerabilidade. Resumo para decisores. Contribuição do Grupo de Trabalho II para o Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas, 2014.

PEIXOTO, José Pinto; OORT, Abraham H. Physics of Climate. **American Institute of Physics**, New York, 1992.

PETERSEN, W. A.; RENNO, N. O. A. TRMM-Based Tropical Cyclone Climatology of Oceanic Precipitation Characteristics. **Monthly Weather Review**, v. 133, n. 1, p. 199-218, 2005.

REBOITA, Michelle Simões; GAN, Manoel Alonso; ROCHA, Rosmeri Porfírio da; AMBRIZZI, Tércio. Precipitation regimes in South America: a bibliography review. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 2, p. 185-204, jun. 2010.

RIZZO, Luciana Varanda. **Os fluxos turbulentos de partículas e de compostos orgânicos voláteis, e a distribuição vertical de aerossóis na baixa troposfera da Amazônia**. 2006. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

- RODRIGUEZ, D. A.; MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A.; ALVARES, C. A. Meteorological characteristics and atmospheric moisture transport associated with rainfall extremes in the metropolitan area of São Paulo. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 9, n. 5, p. 1679-1692, 2009.
- SAHIN, S. Um índice de aridez definido pela precipitação e umidade específica. **Jornal da Hidrologia**, Elsevier, 2012.
- SANTOS, J. C.; RODRIGUES, W. M.; COSTA, J. L. Estudo da densidade do ar e sua relação com a dispersão de poluentes atmosféricos na região metropolitana de Recife, Nordeste do Brasil. *In: Anais do XX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 5967-5974, 2018.
- SANTOS, C. A. G.; NOBRE, C. A. Changes in climate extremes over northeast Brazil and their connection with large-scale atmospheric circulation patterns. **Climate Dynamics**, v. 54, n. 7-8, p. 3235-3250, 2020.
- SAYLOR, P. L.; KNAPPETT, P. S.; ONAC, B. P.; HICKCOX, K. Dominant controls on precipitation  $\delta^{18}\text{O}$  along a 5.2 km elevational transect in the eastern tropical Andes. **Journal of Geophysical**, 2018.
- SERWAY, Raymond A.; JEWETT Jr. John W. **Physics for scientists and engineers with modern physics**. 9 ed, California, USA, 2014.
- SHERWOOD, Steven C.; BONY, Sandrine; DUFRESNE, Jean-Louis. Spread in model climate sensitivity traced to atmospheric convective mixing. **Nature**, v. 505, n. 7481, p. 37-42, 2014.
- SILVA, C. A. Aproveitamento do orvalho como alternativa de suprimento de água em regiões semiáridas. **Simpósio Internacional de Iniciação Científica da USP**, 2010.
- SILVA, A. M. D.; BEZERRA, B. G.; AZZONI, R. S. Análise de correlação entre elementos climáticos e índices de vegetação no semiárido do Rio Grande do Norte. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 1, p. 92-100, 2016.
- SILVA, A. C.; FREITAS, R. S.; CAMPOS, J. L. P. Influência da densidade do ar na formação de nuvens convectivas na região semiárida do nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 33, n. 3, p. 373-383, 2015.
- SILVA, R. M. D.; OLIVEIRA, C. P. D.; SILVA, A. C. D. Variação sazonal da densidade do ar e sua relação com a precipitação no nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 1, p. 101-110, 2013.
- SILVA, L. B. D.; SILVA, G. G. D.; OLIVEIRA, A. M. D.; NETO, J. G. R. Análise de regressão linear simples aplicada à temperatura do ar em uma área de transição Caatinga-Cerrado. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 34, n. 3, p. 451-460, 2019.
- SILVA, Genival da; SOUSA, Francisco de A. S de. Estudo da viabilidade da produção de água a partir do resfriamento do ar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 5, p. 575-580, Campina Grande, Paraíba, 2009.

- SILVA, L. C.; SOUZA, L. C. Avaliação da Incerteza na Estimativa da água precipitável utilizando dados de radar meteorológico. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 22, p.37-48, 2018.
- SINGH, R. K.; SENAY, G. B.; VELPURI, N. M. A Comprehensive review of remote sensing-based evapotranspiration estimation approaches. **Reviews of Geophysics**, v. 57, n. 4, p. 1257-1296, 2019.
- SHUTTLEWORTH, W. J. Evaporation. *In*: MAIDMENT, David R. **Handbook of Hydrology**. McGraw-Hill, 2012. p. 4-53.
- SOLOMON, Susan. Water Vapor and Climate Feedback. **Science**, v. 287.5456, p. 779-780, 2000.
- SOUSA, Marcos Makeison Moreira de. **Pulsos pluviométricos na forma de orvalho e umidade do solo em duas coberturas vegetais em floresta tropical seca**. 2020. 62f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020.
- STULL, Roland B. **Meteorology for Scientists and Engineers**. Brooks/Cole, 2017.
- SUPERINTENDÊNCIA DO DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE (SUDENE). 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/sudene/pt-br> Acesso em: 08 set. 2024.
- TAMISIEA, M. E. Oceans: Sea-level rise. **Revista Nature Geoscience**, v. 3, n. 9, p. 581-582, 2010.
- TAPLEY, B. D.; BETTADPUR, S.; WATKINS, M.; REIGBER, C. The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results. **Geophysical Research Letters**, v. 31, n. 9, 2004.
- TARIQ, S. Orvalho: uma fonte de água potável em áreas áridas e semiáridas. **Journal of Environmental Science and Technology**, v. 7, n. 1, p. 78-86, 2014.
- TEIXEIRA, Raul Fritz Bechtel. Índice de água precipitável da atmosfera a partir dos canais 4 e 5 do AVHRR-NOAA. *In*: Anais **XI SBSR**, Belo Horizonte, p. 1227-1231, 2003.
- TORGE, Wolfgang. **Gravimetry**. Universidade da Califórnia, 1989.
- TRENBERTH, Kevin E.; FASULLO, John T.; SMITH, Lesley. Trends and variability in column-integrated atmospheric water vapor. **Climate Dynamics**, v. 24, n. 7, p. 741-758, 2005.
- TRENBERTH, Kevin E.; DAI, Aiguo; RASMUSSEN, Roy M.; PARSONS, David B. The changing character of precipitation. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 84, n. 9, p. 1205-1217, 2003.
- ULGUIM PEDRA, George; OLIVEIRA FILHO, José Honorato de. Cálculo de água precipitável pelo método de harrison para o ano de 1995 e relação estatística com a precipitação. *In*: **XVI Congresso de Iniciação Científica**, UFPel, 2007.

VIANELLO, Rubens Leite; ALVES, Adil Rainier. **Meteorologia Básica e Aplicações**. Editora Universitária: Viçosa, UFV, 1991. 449p.

VILARINHO, Sandrina de Fátima Soares. **Influência da localização, nas medições efectuadas por uma estação meteorológica, no Campus de Gualtar**. 2009. Dissertação (Mestrado em Física) - Universidade do Minho, Minho, Portugal, 2009.

WAINWRIGHT, C. E.; LAI, C. T. Synoptic controls on precipitation isotopes at the southern edge of the North American monsoon region, Tucson, Arizona. **Journal of Hydrometeorology**, v. 19, n. 9, p. 1461-1476, 2018.

WALLACE, Jonh M.; HOBBS, Peter V. **Atmospheric Science: An Introductory Survey**. **Academic Press**., 2006.

WILKS, Daniel S. **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences**. 3 ed. International Geophysics, 2011.

YOO, Chul-Sang; SHIN, Chang-Kun; YOON, Yong-Nam. Estimativa e Análise de Água Precipitável. **Jornal KSCE de Pesquisa em Engenharia Civil e Ambiental**. Sociedade Coreana de Engenheiros Civis, Coreia, 2004.

ZHANG, Qiang; WANG, Sheng; YANG, Fu-Lin; YUE, Ping; YAO, Tong; WANG, Wen-Yu. Characteristics of dew formation and distribution, and its contribution to the surface water budget in a semi-arid region in China. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 154, n. 2, p. 317-331, 2015.

ZHANG, Q.; ZHANG, L.; XU, C. Y. Wind influence on spatial variation of precipitation over a high-altitude mountain area: implications for stable isotope-based paleoaltimetry. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 22, n. 9, 2018.

## APÊNDICE A – MODELO WANZELER

Este apêndice apresenta a análise da água precipitável no Ceará, utilizando o modelo de Wanzeler *et al.*, (2015), com o intuito de balizar os dados da dissertação. O modelo de Wanzeler utiliza dados de temperatura do ar, temperatura do ponto de orvalho, pressão atmosférica e umidade relativa do ar para calcular a viabilidade da água precipitável, da superfície até o nível de 300 hPa. Para calcular a água precipitável, a seguinte equação foi utilizada:

$$PW(mm) = \frac{1}{g \cdot \rho} \cdot q (P1 - P2) \quad (7)$$

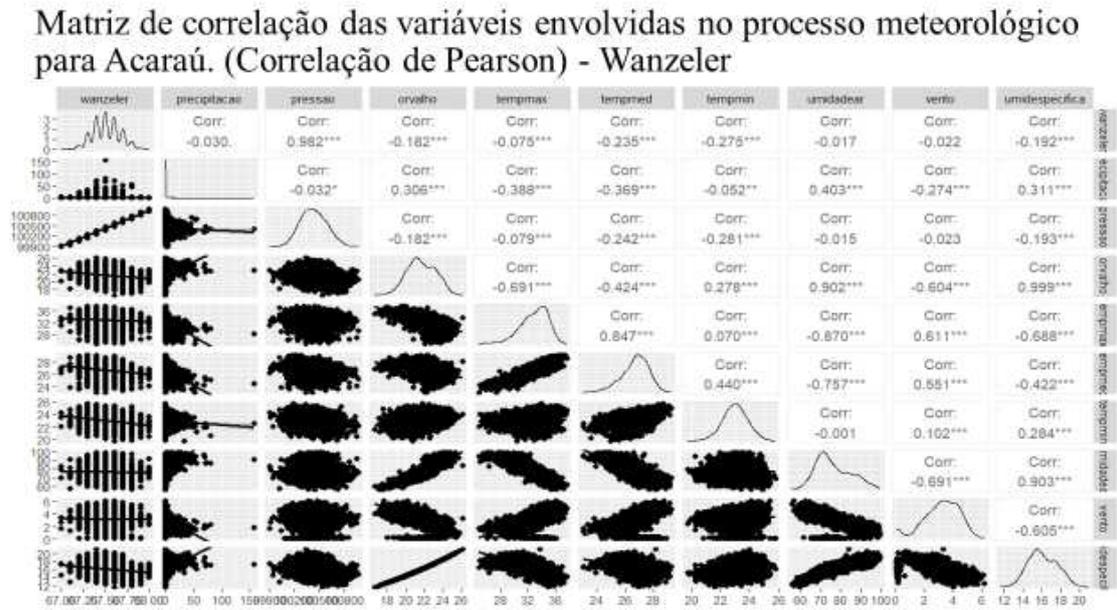
Em que: PW = Água precipitável, g = Aceleração da gravidade ( $m/s^2$ ) = 9,8  $m/s^2$ , q = umidade específica média do nível,  $\rho$  = massa específica ( $kg/m^3$ ), P1 = Pressão na superfície e P2 = Pressão no nível de 300 hPa, que corresponde à camada considerada, pois é até onde a atmosfera contém umidade.

A água precipitável é a quantidade de água expressa em altura ou em massa, que poderiaser obtida se todo o vapor d'água contido em uma coluna de atmosfera de seção transversal horizontal unitária se condensasse e precipitasse. Valores altos de água precipitável podem indicar a possibilidade de ocorrência de precipitação e também podem estar associados a instabilidades locais, quando neste caso existe a possibilidade de ocorrência de intensas chuvas. A análise da água precipitável foi realizada para seis estações pluviométricas no Ceará: Acaraú, Fortaleza, Guaramiranga, Crateús, Morada Nova e Tianguá. Os dados de água precipitável em Acaraú demonstram padrões sazonais, com tendências de aumento e diminuição ao longo das estações. Os valores tendem a ser mais elevados no final de abril, indicando um aumento na umidade atmosférica. Durante o inverno, os valores se estabilizam com poucas flutuações, sugerindo uma diminuição na quantidade de umidade disponível para precipitação. A primavera, por sua vez, apresenta um aumento gradual nos valores de água precipitável, indicando uma mudança sazonal em direção a condições mais úmidas.

A análise dos dados de água precipitável em Guaramiranga, localizada em uma área serrana, revela uma variação sazonal notável, refletindo os ciclos de estação seca e estação chuvosa do Ceará. Apesar da influência da topografia, não se observa uma tendência clara ao longo do período, indicando uma variabilidade natural na quantidade de água precipitável. Os

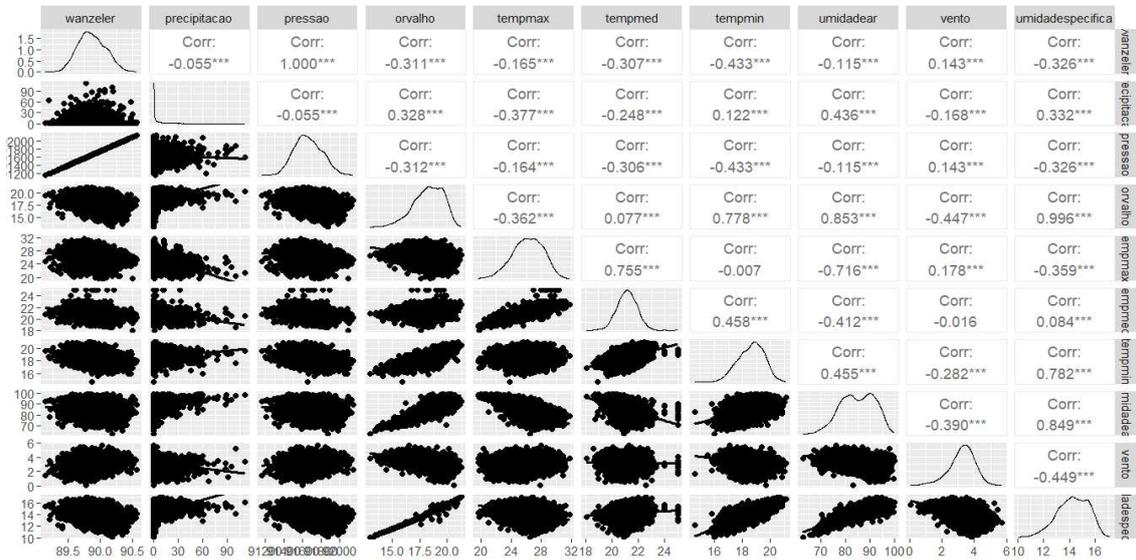
valores de água precipitável em Crateús demonstram poucas variações significativas ao longo do período. Durante a estação chuvosa (janeiro a maio), os índices de água precipitável aumentam, enquanto na estação seca (julho a dezembro), esses valores tendem a diminuir, refletindo o aporte das chuvas sazonais. A análise dos dados de água precipitável em Fortaleza revela uma sazonalidade acentuada, com valores mais elevados durante a estação chuvosa (fevereiro a maio), devido à proximidade com o oceano e à maior umidade atmosférica. Durante a estação seca (junho a dezembro), observa-se uma diminuição nos valores de água precipitável, indicando uma atmosfera menos propensa à ocorrência de chuvas significativas. Os dados de água precipitável em Tianguá, localizada em uma região serrana semiárida, demonstram uma leve sazonalidade. O modelo de Wanzeler indica pequenas oscilações nos valores de água precipitável ao longo do período considerado. A análise dos dados de água precipitável em Morada Nova revela uma distinção em suas características sazonais. O modelo de Wanzeler exibe uma tendência quase linear ao longo do tempo, com um incremento na quantidade de água precipitável durante a estação chuvosa (fevereiro a maio) e uma redução significativa nos valores durante a estação seca (junho a dezembro), refletindo a escassez de chuvas característica do clima semiárido da região. Os valores encontrados para cada modelo demonstram algumas discrepâncias que podem ser atribuídas a variações nos algoritmos e nas variáveis consideradas por cada modelo. As análises revelam tendências sazonais na água precipitável, com valores mais altos durante o verão e menores no inverno. A análise da água precipitável utilizando o modelo de Wanzeler oferece um panorama detalhado da variabilidade da umidade atmosférica em diferentes regiões do Ceará. Os dados obtidos permitem identificar padrões sazonais, entender a influência da topografia e do clima local na precipitação, e fornecer subsídios para a compreensão de eventos meteorológicos, além de contribuir para o desenvolvimento de políticas públicas e projetos de manejo de recursos hídricos mais eficientes e sustentáveis na região.

Figura 34 – Matriz de correlação de *Pearson* para variáveis climáticas em Acaraú (modelo de Wanzeler)



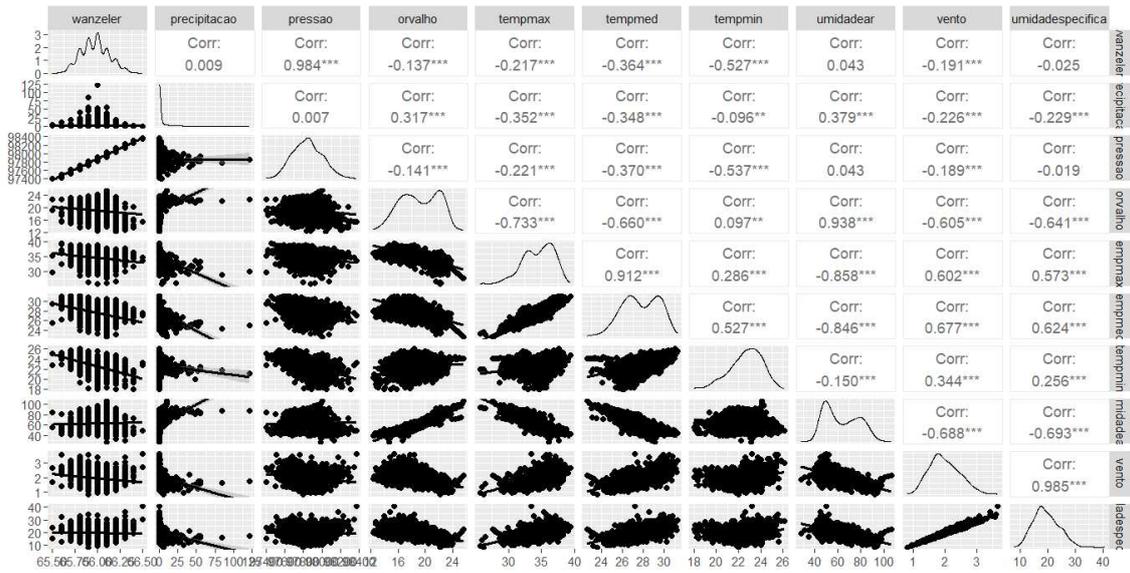
Fonte: Autor (2024)

Figura 35 – Matriz de correlação de *Pearson* para variáveis climáticas em Guarimiranga



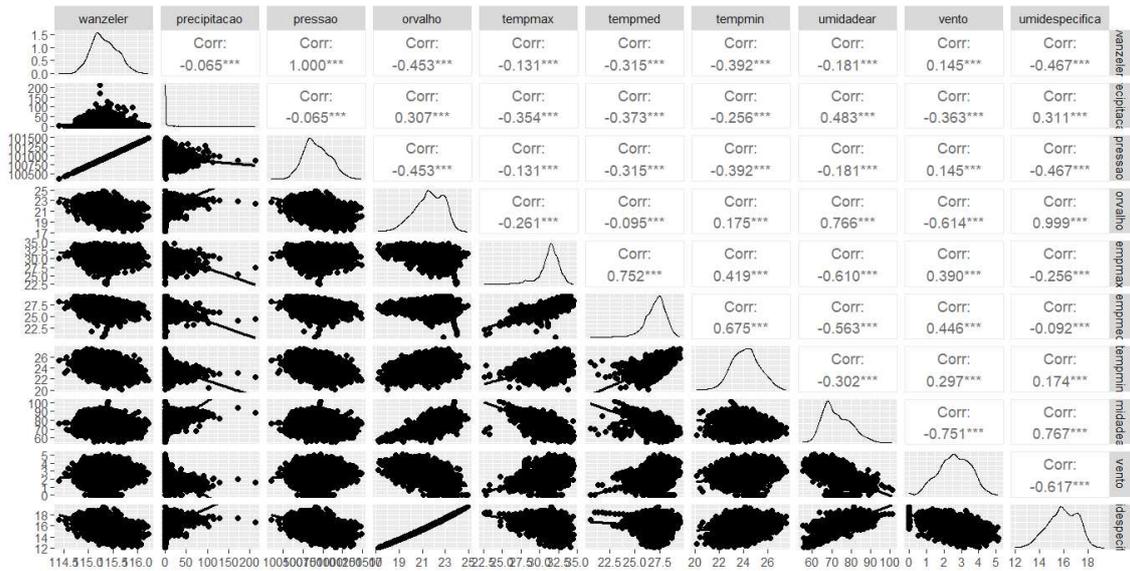
Fonte: Autor (2024)

Figura 36 – Matriz de correlação de *Pearson* para variáveis climáticas em Crateús



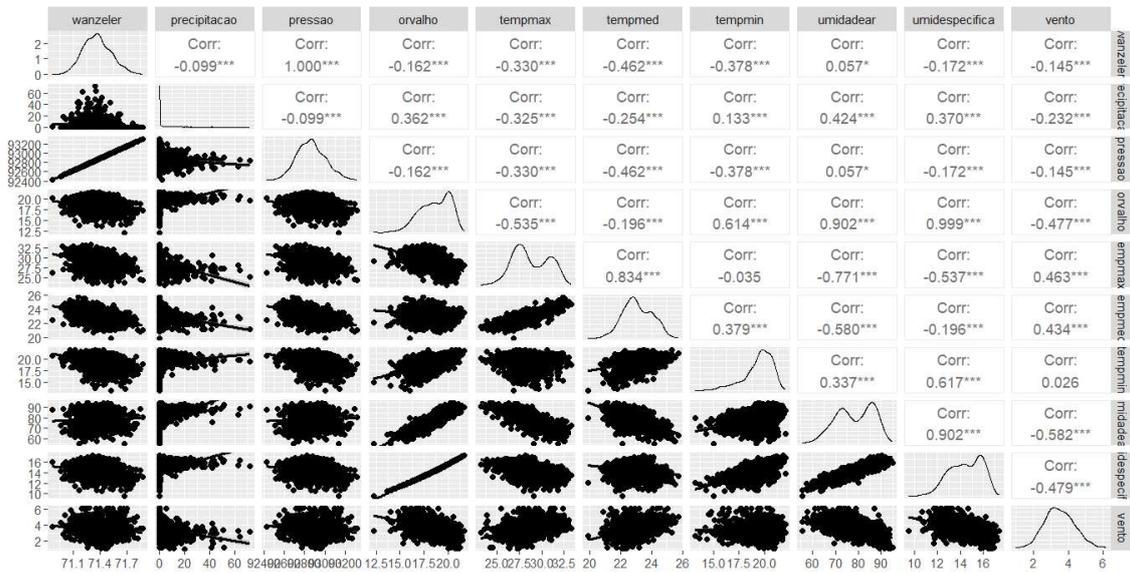
Fonte: Autor (2024)

Figura 37 – Matriz de correlação de *Pearson* para variáveis climáticas em Fortaleza



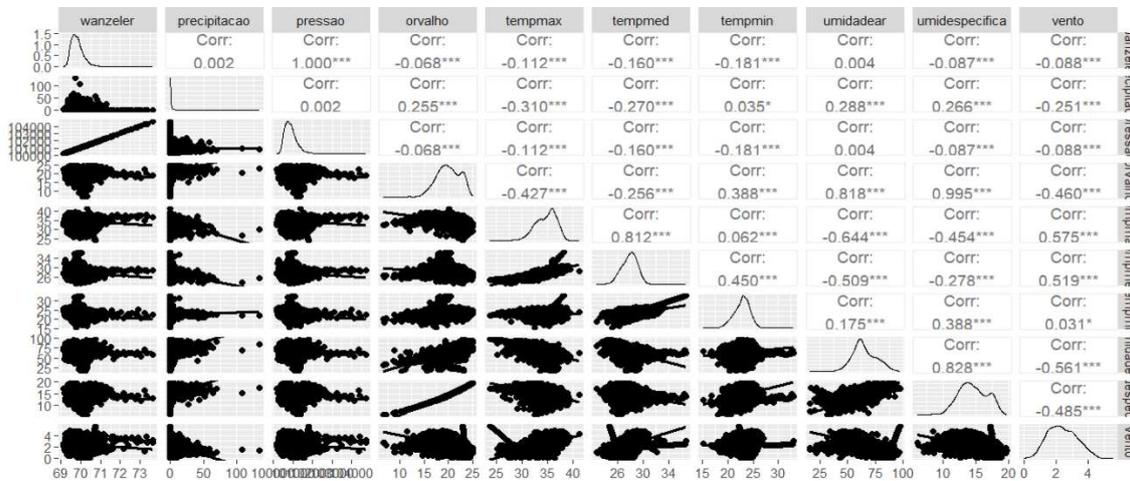
Fonte: Autor (2024)

Figura 38 – Matriz de correlação de *Pearson* para variáveis climáticas em Tianguá



Fonte: Autor (2024)

Figura 39 – Matriz de correlação de *Pearson* para variáveis climáticas em Morada Nova



Fonte: Autor (2024)

Tabela 5 – Demonstrativo da correlação entre as variáveis - Modelo Wanzeler

	Litoral		Serra		Sertão	
	Acaraú	Fortaleza	Guaramiranga	Tianguá	Crateús	Morada Nova
<b>Precipitação</b>	<b>-0,030</b>	<b>-0,065</b>	<b>-0,055</b>	<b>-0,099</b>	<b>0,009</b>	<b>0,002</b>
<b>Pressão Atmosférica</b>	<b>0,982</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>0,984</b>	<b>1</b>
<b>Temperatura do ponto de Orvalho</b>	<b>-0,182</b>	<b>-0,453</b>	<b>-0,311</b>	<b>-0,162</b>	<b>-0,137</b>	<b>-0,068</b>
<b>Temperatura Máxima</b>	<b>-0,075</b>	<b>-0,131</b>	<b>-0,165</b>	<b>-0,330</b>	<b>-0,217</b>	<b>-0,112</b>
<b>Temperatura Média</b>	<b>-0,235</b>	<b>-0,315</b>	<b>-0,307</b>	<b>-0,462</b>	<b>-0,364</b>	<b>-0,160</b>
<b>Temperatura Mínima</b>	<b>-0,275</b>	<b>-0,392</b>	<b>-0,433</b>	<b>-0,378</b>	<b>-0,527</b>	<b>-0,181</b>
<b>Umidade do Ar</b>	<b>-0,017</b>	<b>-0,181</b>	<b>-0,115</b>	<b>0,057</b>	<b>0,043</b>	<b>0,004</b>
<b>Umidade Específica</b>	<b>-0,192</b>	<b>-0,467</b>	<b>-0,326</b>	<b>-0,172</b>	<b>-0,025</b>	<b>-0,087</b>
<b>Velocidade do Vento</b>	<b>-0,022</b>	<b>0,145</b>	<b>0,143</b>	<b>-0,145</b>	<b>-0,191</b>	<b>-0,088</b>

Fonte: Autor (2024)

O modelo Wanzeler apresenta na Tabela 5 a correlação entre as variáveis meteorológicas em três regiões distintas: litoral, serra e sertão. As correlações, expressas em valores numéricos que variam de -1 a 1, indicam a intensidade e o tipo de relacionamento entre as variáveis. -1 representa uma correlação negativa perfeita, 0 indica ausência de correlação e 1 indica uma correlação positiva perfeita. Observa-se que, para a maioria das variáveis, as correlações são predominantemente muito fracas em todas as regiões. Por exemplo, a correlação da precipitação varia de -0,030 a 0,009 para as diferentes localidades, indicando uma relação pouco significativa com as outras variáveis meteorológicas consideradas.

No entanto, a pressão atmosférica apresenta correlações mais fortes e consistentes, mostrando valores próximos a 1 para todas as localidades, o que indica uma forte associação entre a pressão atmosférica e as condições locais em todas as regiões analisadas. As variáveis relacionadas à temperatura (temperatura do ponto de orvalho, temperatura máxima, temperatura média e temperatura mínima) exibem correlações predominantemente negativas em todas as regiões, sugerindo uma relação inversa entre essas variáveis e as condições climáticas locais. As variáveis de umidade do ar e umidade específica também apresentam correlações predominantemente negativas, indicando uma relação inversa com as outras variáveis

meteorológicas consideradas. Concluindo, a velocidade do vento exhibe correlações mistas, variando de fracas negativas a fracas positivas, sugerindo que esta variável pode ter uma influência menos consistente nas condições meteorológicas locais.

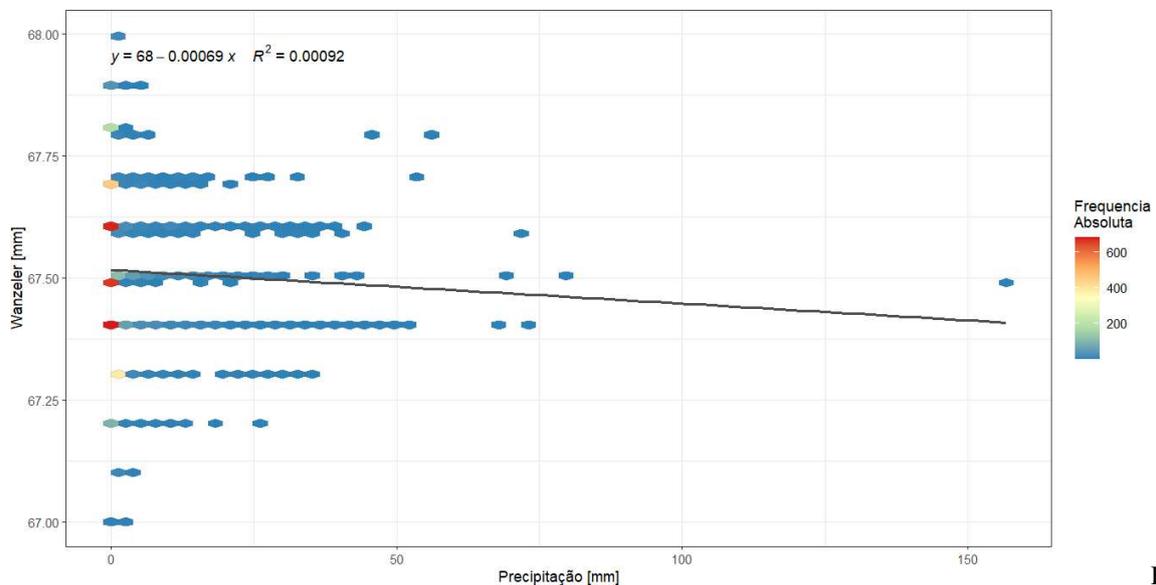
É interessante notar que os valores obtidos pelos métodos de Harrison e Wanzeler variam significativamente entre si para algumas regiões. Como exemplo, em Guaramiranga, a diferença entre os dois métodos é considerável, indicando possíveis variações na metodologia de cálculo ou nas suposições feitas por cada método. Observa-se uma variação na distribuição da água precipitável entre as regiões. Guaramiranga, na serra, possui a maior quantidade de água precipitável segundo ambos os métodos, indicando uma maior disponibilidade de água nessa região em comparação com as outras. As regiões de Crateús e Morada Nova, no sertão, apresentam os menores valores de água precipitável, o que está em linha com as características áridas dessas áreas. No geral, a serra parece ter uma quantidade significativa de água precipitável, especialmente de acordo com o método de Harrison, seguida pelo litoral e, por último, o sertão. Essa distribuição reflete as diferenças climáticas e geográficas entre as regiões, como a influência da altitude, da proximidade com massas de ar úmidas e dos padrões de circulação atmosférica.

Tabela 6 – Resumo estatístico das variáveis climáticas por região no Ceará

	LITORAL		SERRA		SERTÃO	
	Acaraú	Fortaleza	Guaramiranga	Tianguá	Crateús	Morada Nova
Precipitação (mm/ano)	1067,3	1413,3	1556,5	1185,2	673,3	660,3
Evapotranspiração (mm/ano)	1720,6	1628,2	1384,2	1848,7	2005,1	1942,1
Pressão Atmosférica (Pa)	91662	100924	91662	92864	97843	100909
Temp. Orvalho (°C)	18,3	21,6	18,3	18,7	19,2	19,9
Temp. Máxima (°C)	27,3	31,3	27,3	28,8	34,6	34,6
Temp. Média (°C)	21,6	27,3	21,6	23,1	27,7	27,9
Temp. Mínima (°C)	18,7	24,2	18,7	19,4	22,6	22,8
Umidade do Ar (%)	85,4	71,8	85,4	78,4	63,4	64,9
Umidade Específica (g/kg)	14,3	15,9	14,3	14,5	14,3	14,5
Vento (m/s)	3,3	1,9	3,3	3,5	2,0	2,4
Altitude (m)	67,2	29,6	865,5	756,0	298,0	45,0
Metodo Harrison (mm/ano)	29346,0	34419,5	59787,0	45734,5	23250,5	21973,0
Metodo Wanzeler (mm/ano)	42281,6	42091,8	32798,9	26050,1	24079,1	25495,3

Fonte: FUNCEME (2024)

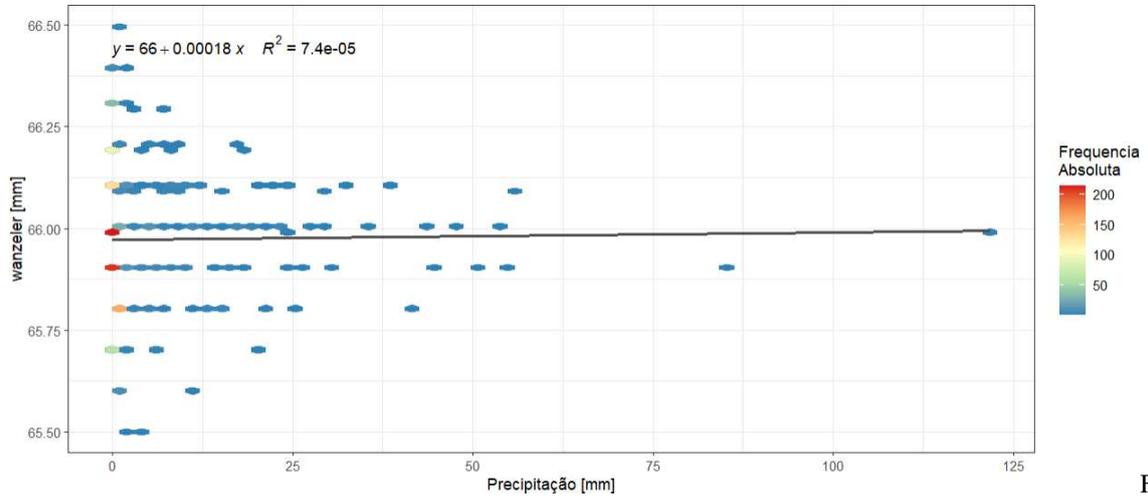
Figura 40 – Modelo Wanzeler-Mota (regressão linear com densidade) Acaraú



Fonte:

Autor (2024)

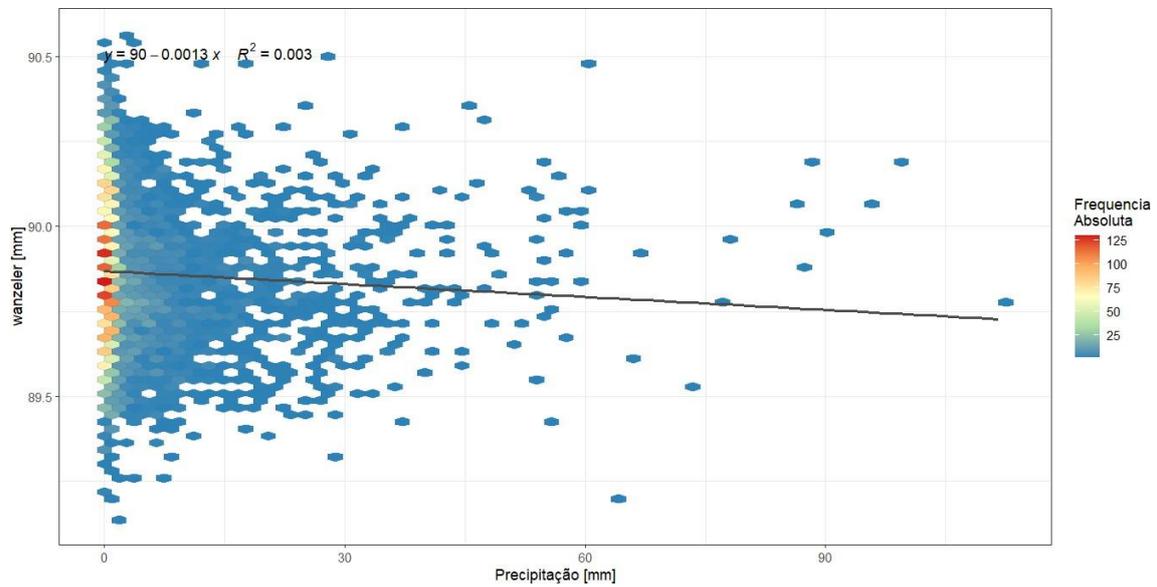
Figura 41 – Modelo Wanzeler-Mota (regressão linear com densidade) Guaramiranga



Fonte:

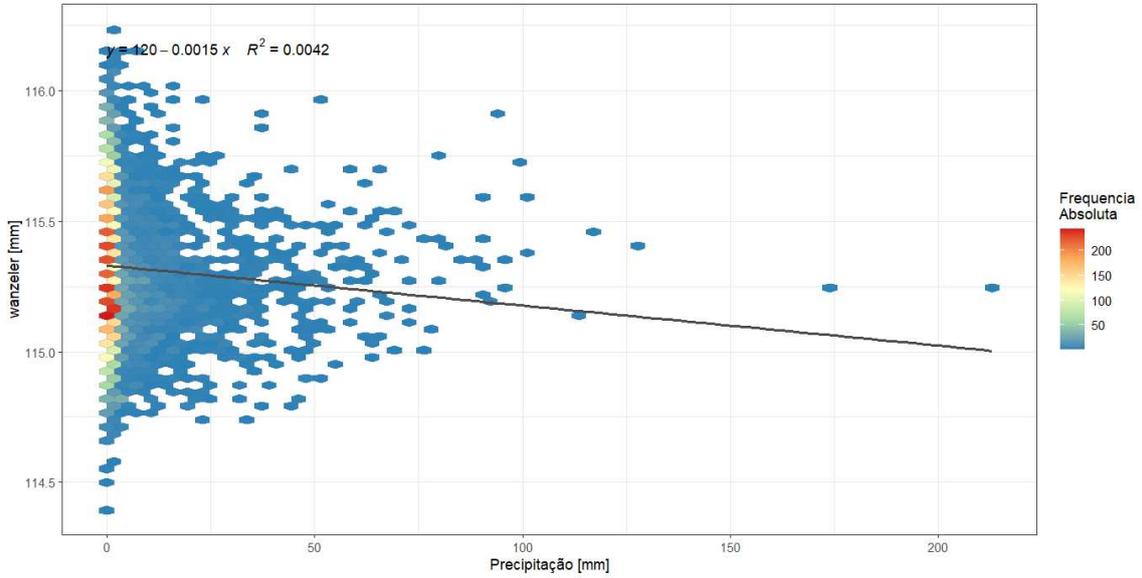
Autor (2024)

Figura 42 – Modelo Wanzeler-Mota (regressão linear com densidade) Crateús



Fonte: Autor (2024)

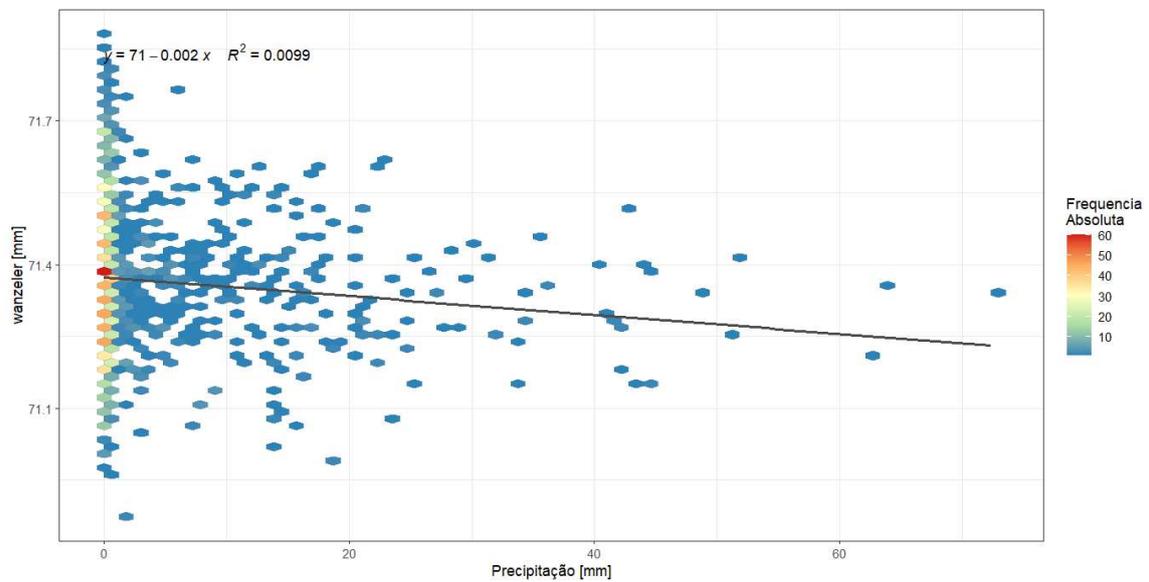
Figura 43 – Modelo Wanzeler-Mota (regressão linear com densidade) Fortaleza



Fonte:

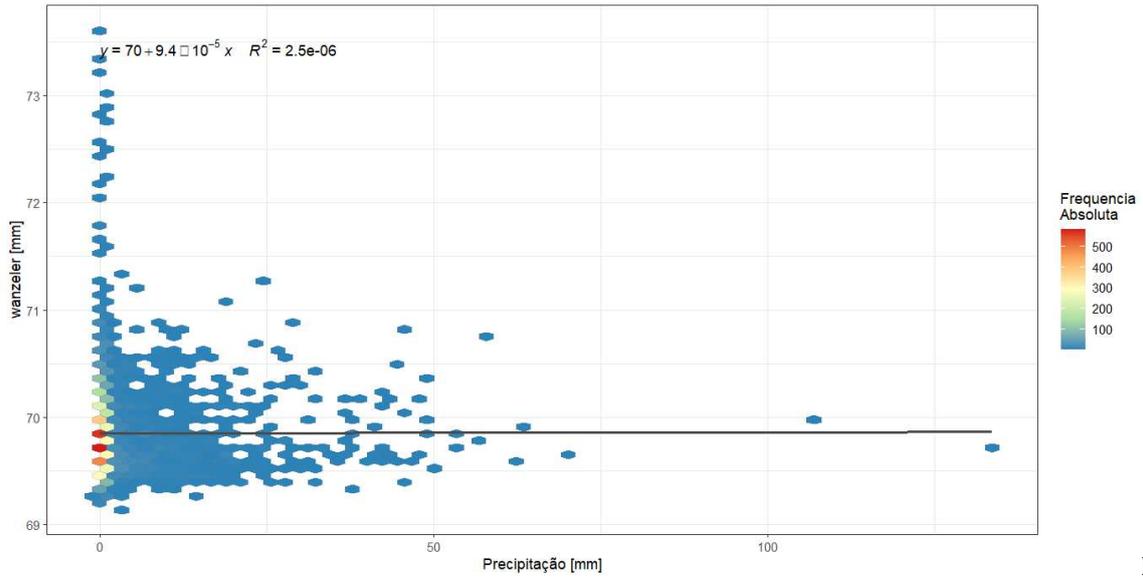
Autor (2024)

Figura 44 – Modelo Wanzeler-Mota (regressão linear com densidade) Tianguá



Fonte: Autor (2024)

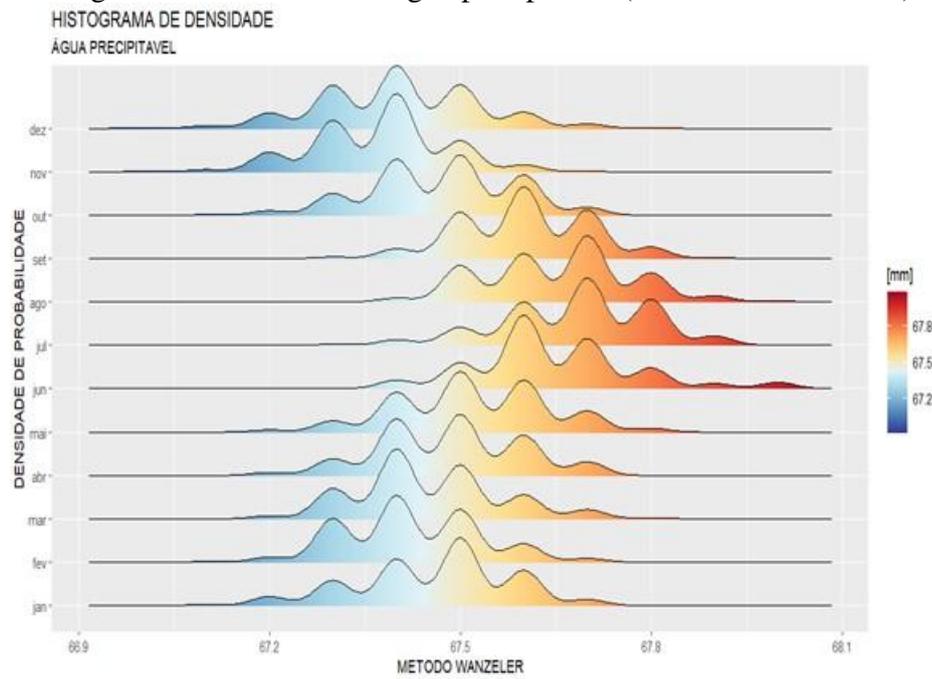
Figura 45 – Modelo Wanzeler-Mota (regressão linear com densidade) Morada Nova



Fonte:

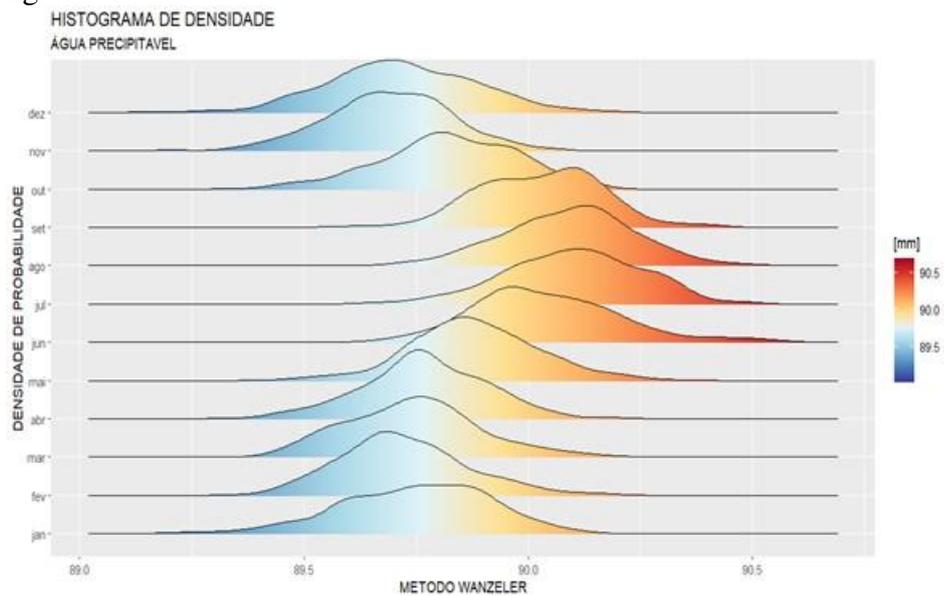
Autor (2024)

Figura 46 – Histograma de densidade da água precipitável (Método de Wanzeler) em Acaraú



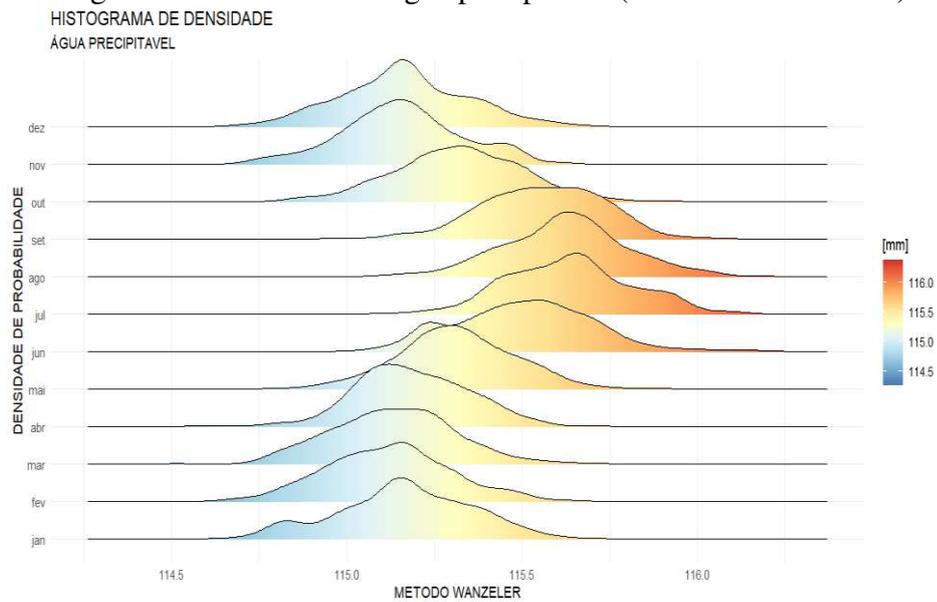
Fonte: Autor (2024)

Figura 47 – Histograma de densidade da água precipitável (Método de Wanzeler) em Guaramiranga



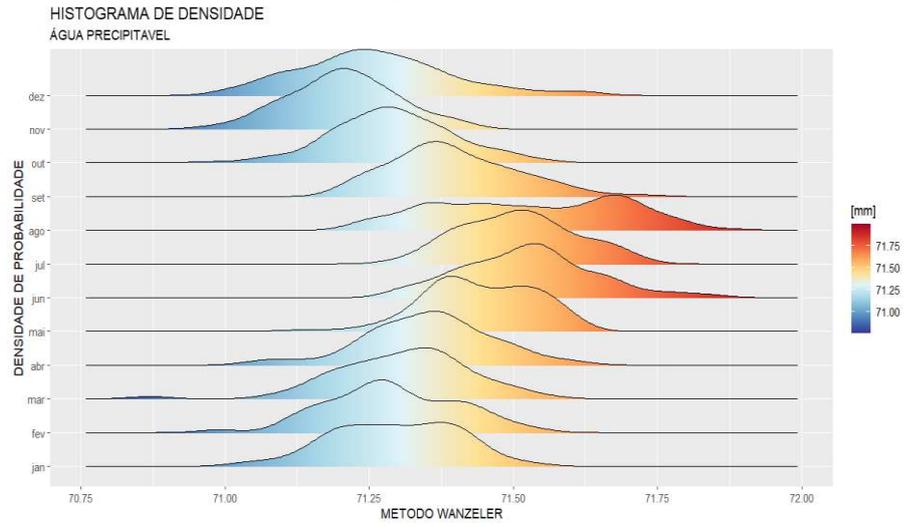
Fonte: Autor (2024)

Figura 48 – Histograma de densidade da água precipitável (Método de Wanzeler) em Fortaleza



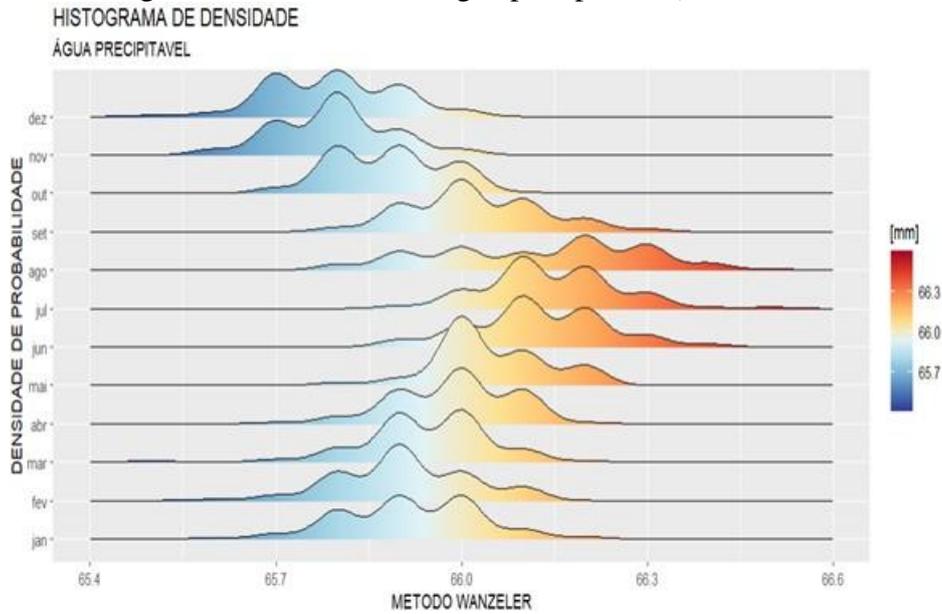
Fonte: Autor (2024)

Figura 49 – Histograma de densidade da água precipitável (Método de Wanzeler) em Tianguá



Fonte: Autor (2024)

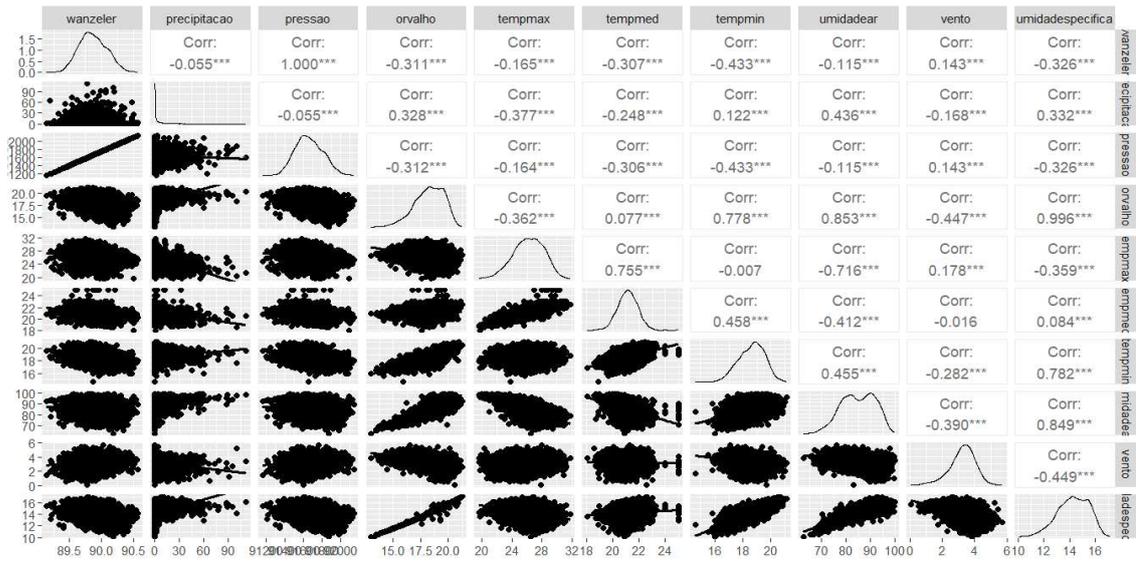
Figura 50 – Histograma de densidade da água precipitável (Método de Wanzeler) em Crateús



Fonte: Autor (2024)

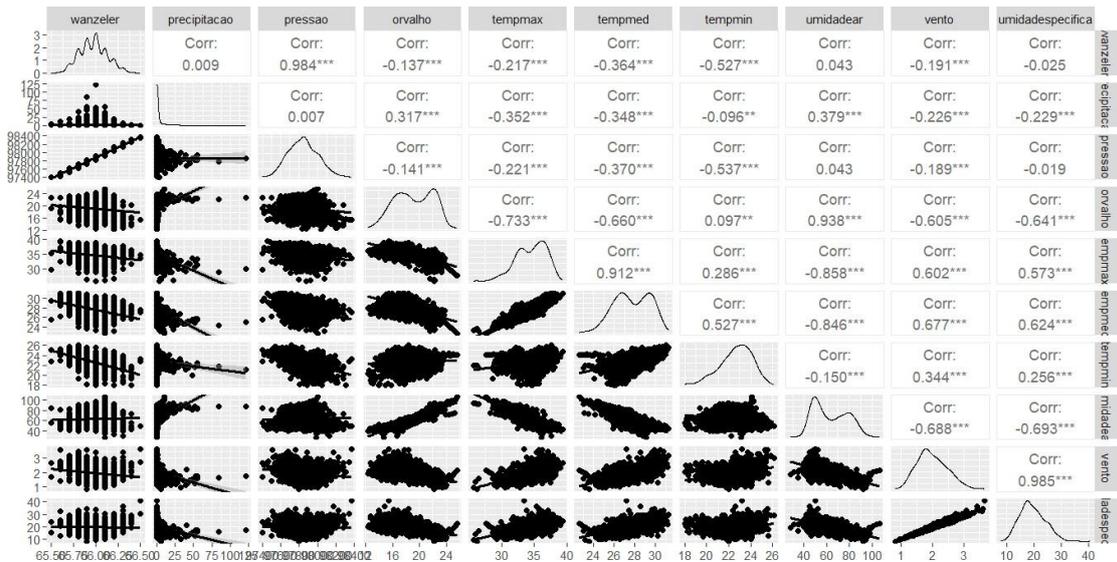


Figura 53 – Correlação de *Pearson* (Método de Wanzeler) em Guaramiranga



Fonte: Autor (2024)

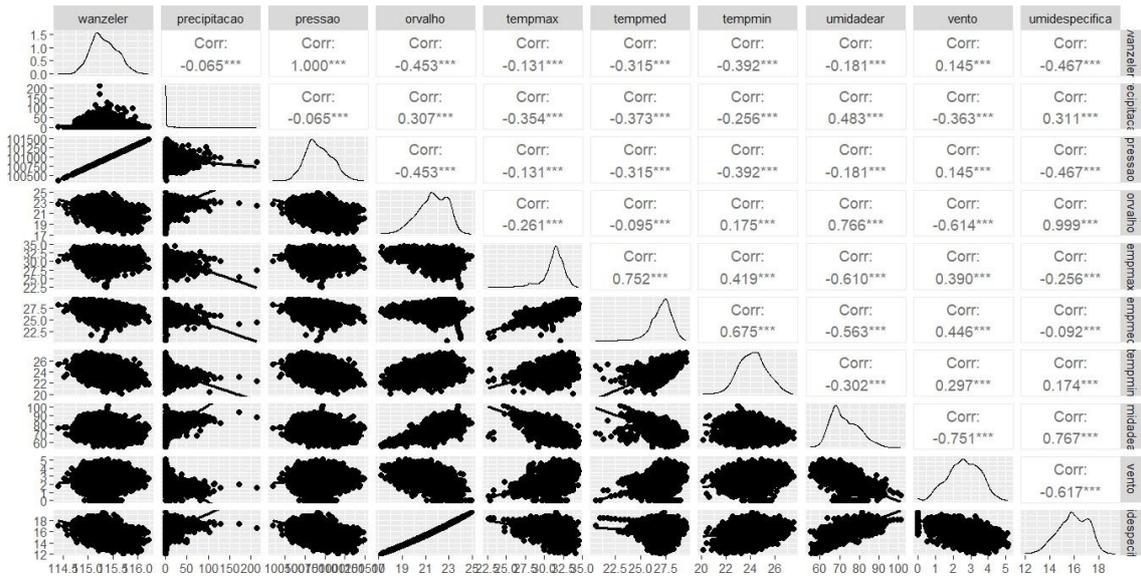
Figura 54 – Correlação de *Pearson* (Método de Wanzeler) em Crateús



Fonte:

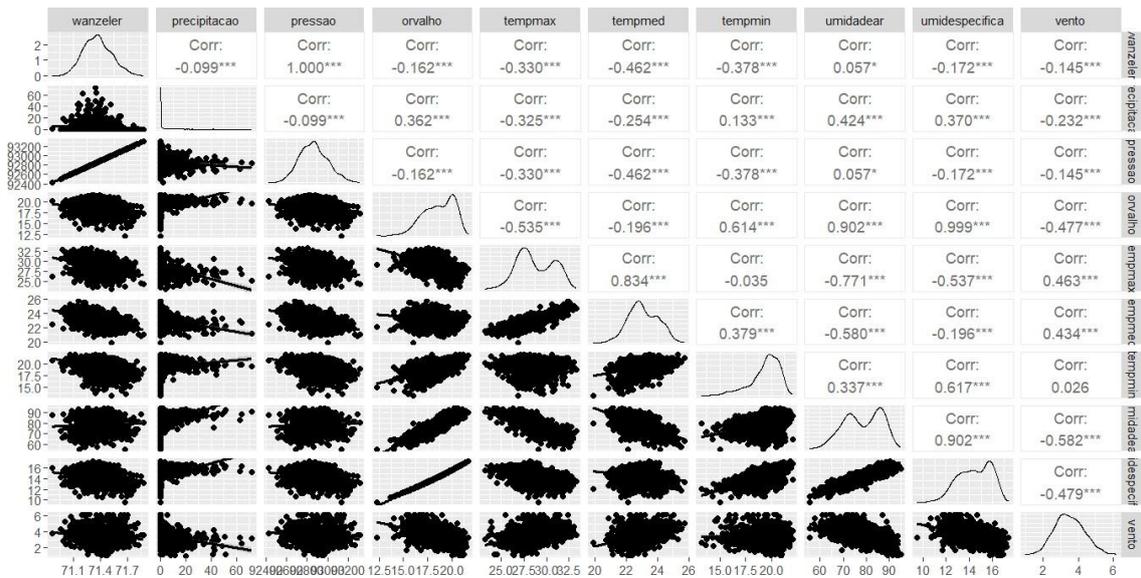
Autor (2024)

Figura 55 – Correlação de *Pearson* (Método de Wanzeler) em Fortaleza



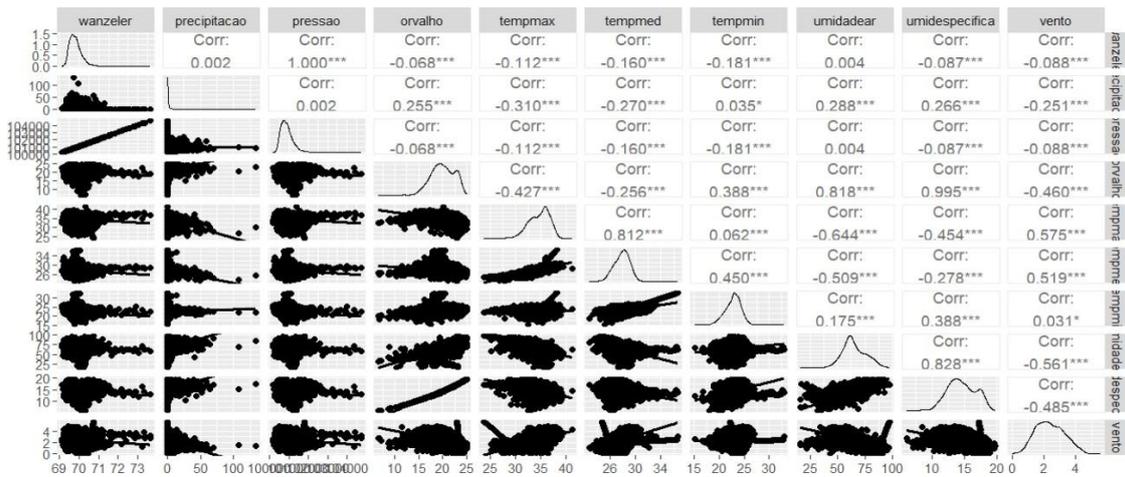
Fonte: Autor (2024)

Figura 56 – Correlação de *Pearson* (Método de Wanzeler) em Tianguá



Fonte: Autor (2024)

Figura 57 – Correlação de *Pearson* (Método de Wanzeler) em Morada Nova



Fonte: Autor (2024)

O modelo Wanzeler apresenta na Tabela 6 a correlação entre as variáveis meteorológicas em três regiões distintas: litoral, serra e sertão. As correlações são expressas em valores numéricos, variando de -1 a 1, onde -1 indica uma correlação negativa perfeita, 0 indica ausência de correlação e 1 indica uma correlação positiva perfeita. Observa-se que, para a maioria das variáveis, as correlações são predominantemente muito fracas em todas as regiões.