



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



THIERS PEREIRA DE SOUZA

**USO DE BASE DE DADOS HIDROLÓGICOS ESPECIALIZADA EM ALTA
RESOLUÇÃO PARA ESTUDO DE INDICADORES CLIMÁTICOS EM SERGIPE**

SÃO CRISTÓVÃO

2023

THIERS PEREIRA DE SOUZA

**USO DE BASE DE DADOS HIDROLÓGICOS ESPACIALIZADA EM ALTA
RESOLUÇÃO PARA ESTUDO DE INDICADORES CLIMÁTICOS EM SERGIPE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de Sergipe, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Ludmilson Abritta Mendes

Agência Financiadora: Fundação de Apoio à Pesquisa e à Inovação Tecnológica do Estado de Sergipe (FAPITEC/SE).

SÃO CRISTÓVÃO

2023

AGRADECIMENTOS

Obrigado Deus pela bênção e oportunidade de viver nesse mundo e poder aprender com todos os seus filhos.

Esse é mais um momento que gosto de olhar para trás e ver o quanto cresci. E seria egoísmo creditar todo esse crescimento a mim, um eterno aluno em busca do aprendizado. Digo isso porque descobri estudando que nunca saberei de tudo. Credito esse crescimento a mim e a todas as pessoas que passaram pela minha vida e que me fizeram galgar esse caminho árduo do aprendizado.

A primeira pessoa que agradeço de forma incondicional é minha mãe. Mulher mais guerreira e corajosa que conheci nesse mundo. Minha maior inspiração, meu espelho e motivo de todos os meus esforços diários.

Agradeço também a meu Tio Pereira. Dono de vasto conhecimento e sabedoria. Seus conselhos são precisos e certos, ouço atentamente cada uma das suas palavras sem perder uma sequer. Além disso, é outra pessoa que acredita em mim de um jeito sem igual. Nunca vou esquecer do que faz e fez por mim.

Em memória da minha prima Tatiana Rocha de Souza. Uma das minhas principais incentivadoras e espelhos para eu estar trilhando esse caminho. Fonte de inspiração em todos os sentidos: conhecimento, garra, amor, generosidade etc. Meu conceito sobre ela: um anjo enviado por Deus. Prolongo meus agradecimentos aos meus tios e primas: Ronaldo, Teresa, Thaís e Thisciana.

Prossigo com meus agradecimentos também aos demais familiares.

Agradeço também a minha namorada Cássia Raquel que sempre me deu forças, apoio e ombro amigo nos momentos mais difíceis. Deixo também o agradecimento a toda família dela que sempre me recebeu de braços abertos.

Tive o prazer também de poder conviver com diversos amigos no campo acadêmico e profissional. No âmbito acadêmico, uma das pessoas que tenho que agradecer é a professora Tatiana Máximo. Se hoje sou pesquisador na área de Recursos Hídricos, devo muito a ela.

No mestrado na Universidade Federal de Sergipe (UFS), o professor Ludmilson Abritta foi mais que um orientador, posso dizer que encontrei um amigo. Ele me fez crescer muito tecnicamente. Possuidor de um vasto conhecimento, raciocínio rápido e uma criatividade admirável, entre tantas outras qualidades que poderia citar. Quem o conhece não deve se surpreender com tais palavras. Porém, posso dizer que o grande valor desse ser humano é seu caráter, algo a se apreciar.

Também no mestrado tive o prazer de ter contato com vários professores e deixo o agradecimento a todos. Na área de recursos hídricos, registro meu agradecimento também ao professor Alcigeimes dono de uma didática incrível.

No âmbito profissional agradeço a todos amigos de trabalho que tive, em especial, aos amigos de SERHMA. Dentre eles: meu amigo João Carlos (melhor tomador de decisão que conheci e um ser iluminado), Ana Paula (dona de uma paciência, calma e paixão pela área que é de se admirar), Márcia (amiga, parceira e uma pesquisadora sensacional), Ronaldo (grande ser humano além de muito sábio), Renilda, Carlos, Bráulio, Chico, Mário, Bira, Ailton, Overland e tantos outros que convivia.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo principal avaliar o comportamento das variáveis hidrometeorológicas de precipitação (P) e evapotranspiração (ETo) em Sergipe, utilizando os dados da base BR-DWGD com alta resolução espacial (0,1°x0,1°) e temporal (1961-2020), produzida por Xavier et al. (2022). Os dados selecionados foram organizados por bacia hidrográfica e agrupados para avaliar as séries anuais, os trimestres mais secos (TMS) e os trimestres mais úmidos (TMU). Além disso, foi calculado o Índice de Aridez (IA) para classificar o clima ao longo dos anos e verificar a suscetibilidade à desertificação no Estado. Para auxiliar no entendimento do comportamento dessas séries ao longo dos anos, foram realizadas análises estatísticas, incluindo testes de estacionariedade como o de Spearman e Mann-Kendall, e o teste de Pettitt para detecção de pontos de mudança. Nessas análises não foram encontradas tendências nas precipitações nem no IA ao avaliar todos os agrupamentos temporais (anual, TMS e TMU) e bacias hidrográficas. Em relação à ETo, observou-se comportamento crescente, em 5 das 8 bacias do Estado nas séries anuais e do TMS. No entanto, na série da ETo TMU não foi possível identificar tal comportamento, porém foi verificado que esta apresentava pouca representatividade em um contexto anual. Análises espaciais foram conduzidas para avaliar as médias de longo termo (MLT) da P, ETo e IA utilizando os agrupamentos anual, TMS e TMU, e dois recortes temporais (1961-1990 e 1991-2020). Essas análises identificaram mudanças na dinâmica de todas essas variáveis. Com o IA, inclusive, foi possível identificar 3 tipos de clima: subúmido úmido, subúmido seco e semiárido, e foi possível identificar as regiões suscetíveis à desertificação, principalmente no noroeste e no sudoeste do Estado. Os mapas e arquivos vetoriais serão compartilhados com a sociedade através do Google Drive. No sentido de ampliar o acesso da sociedade às informações deste trabalho, criou-se um aplicativo para Android denominado PR-ET *mobile*, que permite obter informações sobre a precipitação (P), evapotranspiração (ETo) e o índice de aridez (IA) para todas as bacias hidrográficas de Sergipe. Por fim, foi sugerido um novo critério para compor a delimitação do semiárido, pautado na diferença mensal entre P e ETo, que se mostrou viável tendo em vista os resultados apresentados.

Palavras-chaves: variáveis climáticas, análise estatística, aplicativo.

ABSTRACT

The main objective of this work was to evaluate the behavior of the hydrometeorological variables of evolution (P) and evapotranspiration (ETo) in Sergipe, using data from the BR-DWGD base with high spatial ($0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$) and temporal (1961-2020) resolution.), produced by Xavier et al. (2022). The selected data were organized by river basin and grouped to evaluate the annual series, the driest quarters (TMS) and the wettest quarters (TMU). In addition, the Aridity Index (AI) was calculated to classify the climate over the years and verify the susceptibility to desertification in the State. To help understand the behavior of these series over the years, statistical analyzes were performed, including parking tests such as Spearman and Mann-Kendall, and the Pettitt test for detection of change points. In these analyzes, no trends were discovered in rainfall or AI when evaluating all time groupings (annual, TMS and TMU) and watersheds. Regarding ETo, an increasing behavior was observed in 5 of the 8 basins of the State in the annual and TMS series. However, in the ETo TMU series, it was not possible to identify such behavior, but it was verified that it had little representation in an annual context. Spatial analyzes were performed to evaluate the long-term means (MLT) of P, ETo and AI using annual groupings, TMS and TMU, and two-time frames (1961-1990 and 1991-2020). These analyzes identified changes in the dynamics of all these variations. With the AI, it was even possible to identify 3 types of climates: humid subhumid, dry subhumid and semi-arid, and it was possible to identify the regions susceptible to desertification, mainly in the northwest and west of the state. Specific maps and files will be shared with society through Google Drive. In order to expand society's access to the information in this work, an application for Android called PR-ET mobile was created, which allows obtaining information on the occurrence (P), evapotranspiration (ETo) and the aridity index (IA) for all hydrographic basins of Sergipe. Finally, a new plan was suggested to compose the delimitation of the semi-arid region, based on the monthly difference between P and ETo, which proved to be feasible in view of the results presented.

Keywords: climate variables, statistical analysis, application.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Quantitativo de estações pluviométricas no Brasil por região.....	32
Tabela 2. Estatísticas básicas das variáveis P, ETo e IA anual.	56
Tabela 3. Valor-p dos testes estatísticos das séries anuais de P, ETo e IA (1961-2019), com indicação da tendência de crescimento (▲) ou decrescimento (▼) e do ano de mudança para $\alpha = 5\%$	58
Tabela 4. Estatísticas básicas das variáveis P e ETo para o TMU.	60
Tabela 5. Valor-p dos testes estatísticos das séries do TMU de P, ETo e IA (1961-2019), com indicação da tendência de crescimento (▲) ou decrescimento (▼) e do ano de mudança para $\alpha = 5\%$	61
Tabela 6. Estatísticas básicas das variáveis P e ETo para o TMS.	63
Tabela 7. Valor-p dos testes estatísticos das séries do TMS de P, ETo e IA (1961-2019), com indicação da tendência de crescimento (▲) ou decrescimento (▼) e do ano de mudança para $\alpha = 5\%$	64

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Suscetibilidade à desertificação.....	29
Quadro 2. Índice de Áridez para as diversas classes climáticas.....	29

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Nordeste do Brasil.....	18
Figura 2. Variabilidade espacial da chuva no NEB.....	20
Figura 3. Estado de Sergipe e suas principais bacias hidrográficas.	21
Figura 4. Divisão climática de Sergipe.....	22
Figura 5. Semiárido sergipano segundos os critérios da resolução N° 107, de 27 de julho de 2017.	31
Figura 6. Espacialização das estações pluviométricas no Brasil.	33
Figura 7. Estações meteorológicas operadas pelo INMET.....	34
Figura 8. Espacialização das estações pluviométricas no estado de Sergipe.	35
Figura 9. Espacialização das estações climatológicas do estado de Sergipe.....	36
Figura 10. Estações pluviométricas e climáticas utilizadas para gerar a grade interpolada por Xavier et al. (2022).	40
Figura 11. Representação espacial, em forma de pontos, da base de dados de Xavier et al. (2022).	42
Figura 12. Polígonos de Thiessen (Voronoi) para os pontos da base de dados gradeados.	43
Figura 13. Agrupamento dos pontos da grade BR-DWGD por bacia hidrográfica.	44
Figura 14. Método IDW.	46
Figura 15. Fluxo metodológico adotado para avaliação das variáveis climatológicas.....	51
Figura 16. Fluxo para confecção do aplicativo.....	52
Figura 17. Fluxo para definição de critério alternativo para delimitação da região semiárida sergipana.....	53
Figura 18. Precipitações médias históricas mensais e de longo termo das bacias hidrográficas do estado de Sergipe.	55
Figura 19. Isolinhas da MLT da precipitação anual dos períodos: (A) 1961 a 1990 e (B) 1991 a 2020, e percentual da área do Estado para as faixas de precipitação consideradas.	69
Figura 20. Isolinhas da MLT da evapotranspiração anual dos períodos: (A) 1961 a 1990 e (B) 1991 a 2020, e percentual da área do Estado para as faixas de evapotranspiração consideradas.	70
Figura 21. Isolinhas da MLT do índice de aridez anual dos períodos: (A) 1961 a 1990 e (B) 1991 a 2020, e percentual da área do Estado para as faixas de índice de aridez consideradas.....	71
Figura 22. Isolinhas da precipitação MLT _{TMU} dos períodos: (A) 1961 a 1990 e (B) 1991 a 2020, e percentual da área do Estado para as faixas de índice de aridez consideradas.....	74

Figura 23. Isolinhas da evapotranspiração MLT_{TMU} dos períodos: (A) 1961 a 1990 e (B) 1991 a 2020, e percentual da área do Estado para as faixas de índice de aridez consideradas.	75
Figura 24. Isolinhas da precipitação MLT_{TMS} dos períodos: (A) 1961 a 1990 e (B) 1991 a 2020, e percentual da área do Estado para as faixas de índice de aridez consideradas.	77
Figura 25. Isolinhas da evapotranspiração MLT_{TMS} dos períodos: (A) 1961 a 1990 e (B) 1991 a 2020, e percentual da área do Estado para as faixas de índice de aridez consideradas.	78
Figura 26. Tela inicial do aplicativo PR-ET mobile.....	80
Figura 27. Tela com informações sobre o marcador selecionado do aplicativo PR-ET mobile.	81
Figura 28. Espacialização da grade BR-DWGD.	82
Figura 29. Municípios do semiárido de Sergipe 2017.....	83
Figura 30. Calibração dos parâmetros do critério.....	84
Figura 31. Delimitação Semiárido fazendo uso do critério proposto.....	85
Figura 32. Fluxo para obtenção dos municípios a serem enquadrados no semiárido pelo critério proposto.....	86
Figura 33. Comparação das regiões semiáridas.....	87
Figura 34. Comparação semiárido pelo critério proposto e decretações de seca e estiagem, entre 2013-2020, da SUPDEC do estado de Sergipe.....	88

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

ASCONDIR-SE - Associação dos Concessionários do Distrito de Irrigação do Platô de Neópolis

BR-DWGD - *Brazilian Daily Weather Gridded Data*

CEMADEN - Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais

CHESF - Companhia Hidrelétrica do São Francisco

CODEVASF - Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba

DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica

DOL - Distúrbios Ondulatórios de Leste

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

ENOS – El Niño-Oscilação Sul

ESRL - *Earth System Research Laboratory*

ETP - Evapotranspiração Potencial

FUNCEME - Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos

IA - Índice de Aridez

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

INPE - Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais

INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial

IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*

LI - Linhas de Estabilidade

MLT – Média de Longo Termo

NEB - Nordeste do Brasil

ODP – Oscilação Decenal do Pacífico

OMM - Organização Mundial de Meteorologia

PERH-SE - Plano Estadual de Recursos Hídricos de Sergipe

PNMC - Política Nacional sobre Mudanças do Clima

PROGESTÃO - Programa de Consolidação do Pacto Nacional pela Gestão das Águas

RNH - Rede Hidrometeorológica Nacional

SEDURBS - Secretaria de Estado do Desenvolvimento Urbano e Sustentabilidade

SERHMA - Superintendência Especial de Recursos Hídricos e Meio Ambiente

SF - Sistemas Frontais

SIMEPAR - Sistema Meteorológico do Paraná

SPI - *Standardized Precipitation Index*

SUDENE - Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste

VCAN - Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis

ZCAS - Zona de Convergência do Atlântico Sul

ZCIT - Zona de Convergência Intertropical

SCM - Sistemas Convectivos de Mesoescala

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	15
1.2 OBJETIVOS	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 CARACTERIZAÇÃO DO ESPAÇO, CLIMA E ASPECTOS RELATIVOS À VARIABILIDADE CLIMÁTICA NO NEB.....	18
2.1.1 Características Espaciais e Climáticas do NEB	18
2.1.2 Características Espaciais e Climáticas de Sergipe	20
2.2 COMPORTAMENTO DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS	22
2.2.1 Aspectos Gerais.....	22
2.2.2 Análise Estatística	23
2.2.3 Estudos sobre o Comportamento da Precipitação e Evapotranspiração no NEB	27
2.2.4 Indicadores Climáticos baseados na Precipitação e na Evapotranspiração	28
2.3 DELIMITAÇÃO DO SEMIÁRIDO	30
2.4 REDE HIDROMETEROLOGICA NACIONAL (RHN)	31
2.4.1 Rede Hidrometeorológica do Estado de Sergipe	34
2.5 SISTEMAS DE INFORMAÇÕES SOBRE RECURSOS HÍDRICOS.....	36
2.6 BASE DE DADOS GRADEADOS.....	37
3. MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1 INVESTIGAÇÃO DAS VARIÁVEIS CLIMATOLÓGICAS EM SERGIPE.....	42
3.1.1 Representação e Seleção de Pontos.....	42
3.1.2 Aquisição dos Dados.....	44
3.1.3 Geração de Séries Climatológicas por Bacia Hidrográfica.....	44
3.1.4 Cálculo do Índice de Aridez.....	45
3.1.5 Definição do Ano Hidrológico.....	45
3.1.6 Análises Estatísticas	45
3.1.7 Mapas e Shapefiles.....	45

3.1.8 Aplicativo <i>Mobile</i>	47
3.2 DEFINIÇÃO DE CRITÉRIO ALTERNATIVO PARA DELIMITAÇÃO DO SEMIÁRIDO SERGIPANO.....	48
3.2.1 Aquisição dos dados de P e ETo.....	48
3.2.2 Balanço entre P e ETo.....	48
3.2.3 Percentual do balanço negativo entre P e ETo.....	48
3.2.4 Calibração e obtenção do percentual a ser adotado pelo critério.....	49
3.2.5 Formalização do critério e delimitação do Semiárido Sergipano.....	49
3.2.6 Comparação entre delimitações do Semiárido.....	50
3.3 FLUXOGRAMAS DO ESTUDO.....	51
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	54
4.1 INVESTIGAÇÃO DAS VARIÁVEIS CLIMATOLÓGICAS.....	54
4.1.1 Pré-Processamento dos Dados.....	54
4.1.2 Análises Estatísticas.....	56
4.1.3 Investigação Espacial através de Mapas.....	66
4.1.4 Aplicativo <i>Mobile</i>	79
4.2 DEFINIÇÃO DE CRITÉRIO ALTERNATIVO PARA DELIMITAÇÃO DO SEMIÁRIDO SERGIPANO.....	82
4.2.1 Aquisição dos dados, cálculo do balanço e espacialização dos dados.....	82
4.2.2 Calibração e obtenção do percentual a ser adotado.....	83
4.2.3 Formalização do critério e delimitação do Semiárido.....	84
4.2.4 Comparação entre delimitações do semiárido.....	86
5. CONCLUSÕES.....	89
REFERÊNCIAS.....	92
APÊNDICES.....	99

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As atividades antrópicas causam impactos significativos no meio ambiente sendo que uma de suas consequências é o impacto sobre o clima. Tais mudanças são temas abordados nos relatórios ¹ do IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change* ou Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas). O último relatório inclusive, elaborado no ano de 2021, acende um alerta vermelho para a toda humanidade ao indicar que as mudanças climáticas atingem todas as regiões da terra e que irão piorar (MILLER, 2021).

O Nordeste do Brasil (NEB) é uma região que, ao longo do tempo convive com tais mudanças. Eventos climáticos extremos (seca e inundação) geram impactos econômicos e sociais muitas vezes imensuráveis (BRASIL, 2005 apud CRUZ, 2017). E, infelizmente, as projeções futuras para esta região não são das melhores. O IPCC projeta um aumento na intensidade, duração e frequência de eventos climatológicos extremos, na região Nordeste da América do Sul (região na qual insere-se o NEB) (IPCC, 2021).

O contexto de mudanças no clima afeta diretamente o ciclo hidrológico e suas variáveis (TUCCI e BRAGA, 2003). Logo, compreender e monitorar as variáveis hidrometeorológicas é fundamental para elaboração de políticas públicas e para gestão dos recursos hídricos, de forma que estas possam contribuir na prevenção dos impactos negativos gerados por estas mudanças.

A precipitação e a evapotranspiração são as mais importantes variáveis do ciclo hidrológico. A primeira é a principal forma de entrada de água em uma bacia hidrográfica e a segunda é outra variável de grande importância, já que a evapotranspiração devolve à atmosfera cerca de 60% de toda água precipitada sobre o solo, e sua variação pode influenciar rios e lagos (ROCHA JÚNIOR, 2020; COLLISCHON E DORNELLES, 2015).

A avaliação dessas duas variáveis pode ser feita através de análises estatísticas das suas séries temporais, que geralmente são obtidas através de postos pluviométricos e climatológicos (meteorológicos), respectivamente, sendo que tais análises têm como intuito extrair de amostras, dentre outras coisas, pontos de mudança e tendências de aumento ou decréscimo ao longo do tempo para variáveis estudadas (SANTOS, 2016; NAGHETTINI e PINTO, 2007).

Além disso, relações entre a precipitação e a evapotranspiração ajudam a dar informações de grande valor acerca do comportamento climático de uma região (CABRAL

¹ <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>

JÚNIOR E BEZERRA, 2018). Uma dessas relações materializa-se através do Índice de Aridez (IA), que, além do potencial de classificar o clima de uma região, é também utilizado para monitorar a suscetibilidade à desertificação. Mudanças neste índice refletem impactos sobre o ciclo hidrológico, gestão recursos hídricos e ecossistema da região (TABARI et al., 2014).

O fenômeno da desertificação é considerado como uma sequência de modificações regressivas do solo, da vegetação e do regime hídrico, causando a deterioração biológica provocada por fatores climáticos e por ações antrópicas, atuando de forma conjunta ou isolada. Dentre as 5 regiões do Brasil, o NEB é a mais suscetível a esse processo (CGEE, 2016).

Diante desse contexto do NEB, torna-se importante monitorar regiões suscetíveis a tais fenômenos para antever situações adversas, uma vez que a dinâmica atual é a gestão de riscos, ao invés da gestão de crises. A gestão de riscos é pautada no planejamento, em estudos ambientais antes mesmo da materialização de impactos (SERGIPE, 2021).

Diferentemente de outros índices que utilizam apenas a chuva, como o SPI (*Standardized Precipitation Index*), o IA utiliza dados de evapotranspiração potencial (ETP) e precipitação (P), o que torna a análise mais detalhada, pois excedentes de ETP podem ser importantes indicativos de mudanças climáticas (CABRAL JÚNIOR E BEZERRA, 2018). Por outro lado, a adição de uma nova variável pode ter um impacto negativo, uma vez que a densidade de estações com medição de evaporação é menor do que a rede de monitoramento pluviométrico, deixando assim o estudo menos representativo.

Diante disto, Xavier et al. (2022) deram uma contribuição para contornar tais dificuldades, uma vez que eles produziram uma grade de dados interpolados, denominada *Brazilian Daily Weather Gridded Data* (BR-DWGD). Esta possui, dentre outras características, alta resolução espacial ($0,1^\circ \times 0,1^\circ$) para todo do Brasil com dados de precipitação, evapotranspiração, temperatura máxima e mínima, radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento.

Dada a importância desta temática em todas as escalas (global, nacional, estadual e municipal), a presente pesquisa fez uma investigação das variáveis do ciclo hidrológico (chuva e evapotranspiração) e do IA de modo a verificar suscetibilidade à desertificação no contexto estadual, dando aos órgãos responsáveis subsídios para agir de forma preventiva quanto aos impactos provenientes dos eventos hidrometeorológicos críticos. Além disso, essa investigação envolveu a proposta de critério alternativo para delimitar a região semiárida de Sergipe atendendo uma das recomendações sugeridas por SUDENE (2021) como uma contribuição científica relevante para o tema.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar o comportamento das variáveis hidrometeorológicas de precipitação e evapotranspiração em Sergipe, a partir da base de dados BR-DWGD, elaborada por Xavier et al. (2022) disponibilizada publicamente. Os objetivos específicos são:

- Investigar o comportamento de diferentes variáveis relacionadas à precipitação e à evapotranspiração potencial no estado de Sergipe;
- Avaliar, por meio do Índice de Aridez (IA), a suscetibilidade à desertificação e a classificação climática no estado de Sergipe;
- Propor um novo critério de delimitação do semiárido sergipano, que tenha uma melhor reprodutibilidade e que seja baseado em variáveis obtidas de formas mais simples;
- Sistematizar de forma cartográfica mapas e arquivos vetoriais georreferenciados (*shapefiles*) como forma de difundir as informações para toda a sociedade e órgãos responsáveis pela gestão de riscos em Sergipe;
- Elaborar um *app* com interface amigável, como forma de difundir e facilitar o acesso às informações produzidas por este trabalho, uma vez que grande parte dos brasileiros têm acesso a um smartphone.

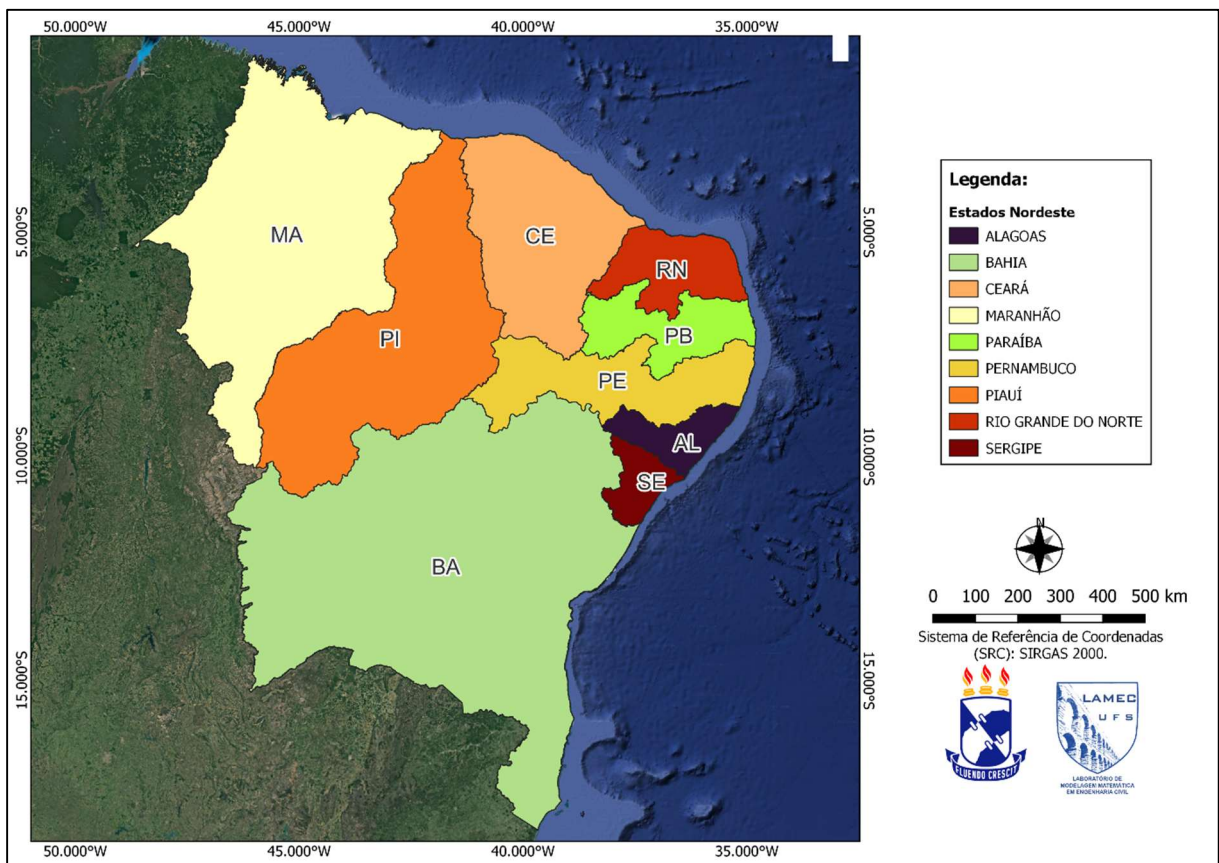
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CARACTERIZAÇÃO DO ESPAÇO, CLIMA E ASPECTOS RELATIVOS À VARIABILIDADE CLIMÁTICA NO NEB

2.1.1 Características Espaciais e Climáticas do NEB

Fazem parte do NEB as seguintes Unidades da Federação: Alagoas, Bahia, Ceará, Maranhão, Paraíba, Piauí, Pernambuco, Rio Grande do Norte e Sergipe, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1. Nordeste do Brasil.



Fonte: Produzido nesta pesquisa (2023).

Esta região possui, segundo o censo do IBGE 2022, uma área de 1.552.175 km² e 54.644.582 habitantes. Limita-se ao norte e a leste pelo oceano Atlântico, a oeste aproximadamente pelo meridiano de 47°W e os estados do Tocantins, Pará e Goiás e ao sul pelo paralelo 18°S e os estados de Minas Gerais e Espírito Santo (CAVALCANTI et al., 2015).

Alguns autores dividem o NEB em três regiões: a porção costeira, semiárida e a porção mais a oeste. A primeira é recoberta por fragmentos de mata atlântica com características mais úmidas e que apresenta uma precipitação média anual de aproximadamente 1.500 mm. O semiárido é recoberto pela vegetação caatinga, corresponde a aproximadamente 60% do NEB e o índice pluviométrico gira em torno de 800 mm/ano, e a área mais a oeste contém vegetação de cerrado e precipitação média anual superior a 1.000 mm (RODRIGUES et al., 2019).

Segundo Cavalcanti et al. (2015), o NEB possui três tipos de clima com precipitação variando entre 300 mm a 2.000 mm, são eles: o clima litorâneo úmido (que vai do litoral da Bahia ao do Rio Grande do Norte), o clima tropical (em áreas dos estados da Bahia, Ceará, Maranhão e Piauí) e clima tropical semiárido (em todo sertão nordestino).

No que se refere a distribuição temporal da chuva, Tucci (2015) ressalta que o leste do NEB tem precipitações máximas entre maio e agosto, o sul entre novembro e dezembro, e o semiárido entre fevereiro e maio.

Percebe-se que uma das principais características do NEB é a alta variabilidade climática. Esta se manifesta em um padrão de variabilidade sazonal, interanual e interdecadal (TUCCI, 2015; MARENGO et al. 2011).

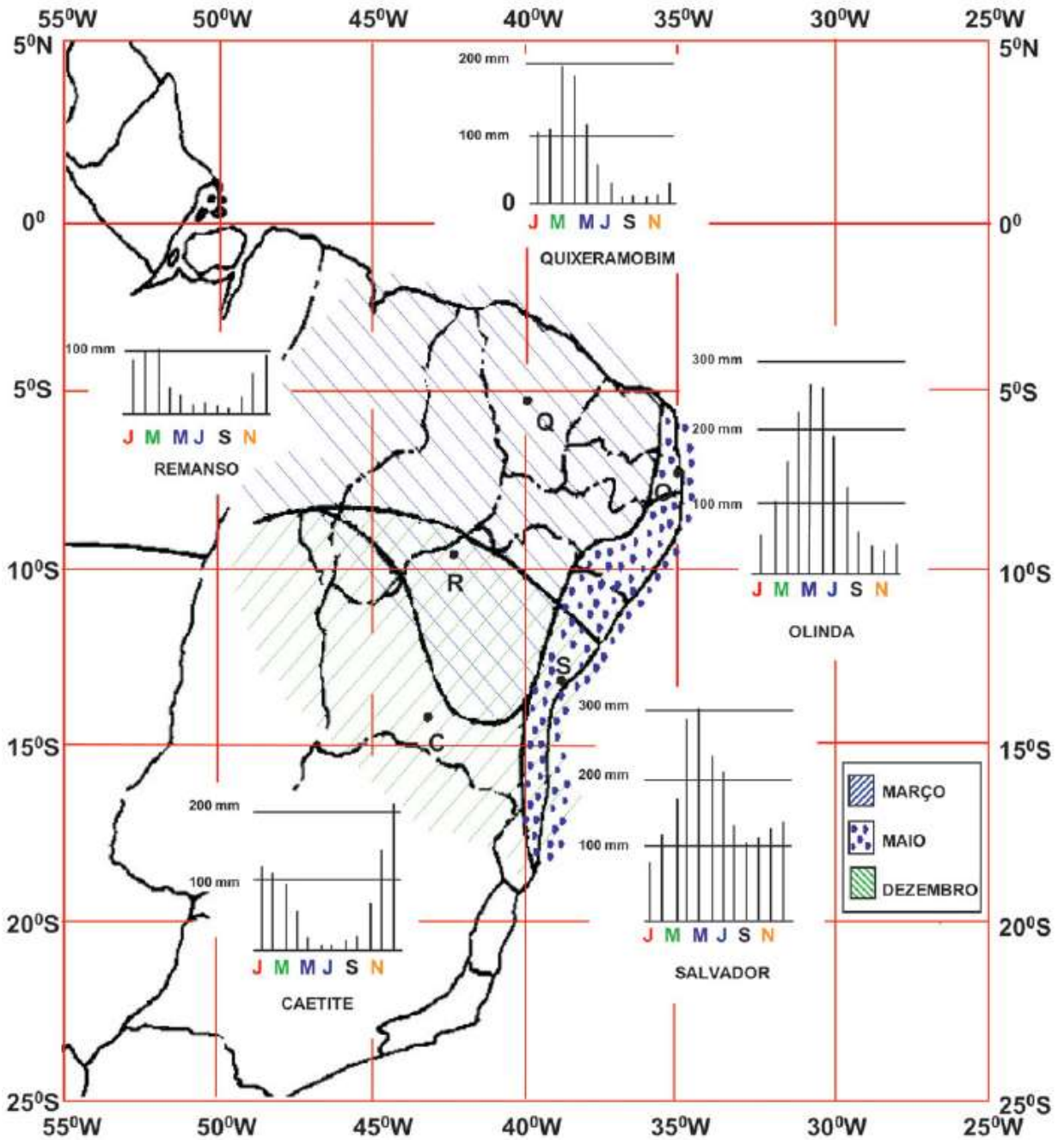
A variabilidade sazonal, aquela que acontece ao longo dos meses, no NEB, é influenciada por fatores geográficos, de relevo, da natureza da superfície e dos sistemas de tempo atuantes na região. Dentre os principais sistemas que influenciam na variabilidade sazonal estão: Linhas de Estabilidade (LI), Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOL), Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN), Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), Sistemas Frontais (SF) e Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM) (CAVALCANTI et al. 2015; ABREU, et al. 2019).

A variabilidade interanual, de baixa frequência, que acontece ao longo dos anos, no NEB tem forte ligação com a alternância das condições do oceano Pacífico Equatorial, estando mais quente (El Niño) ou mais frio (La Niña). Essa dinâmica denominada de El Niño-Oscilação Sul (ENOS) é um fenômeno em escala global de interação oceano-atmosfera (Timmermann et al, 2018; MARENGO et al. 2011).

Já a variabilidade interdecadal ou decenal, de mais baixa frequência, pode modular a variabilidade interanual. Um exemplo desta é a Oscilação Decenal (Decadal) do Pacífico (ODP) (MARENGO et al. 2011; CAVALCANTI et al. 2015).

A Figura 2 ilustra a variabilidade espacial e temporal da precipitação no NEB.

Figura 2. Variabilidade espacial da chuva no NEB.

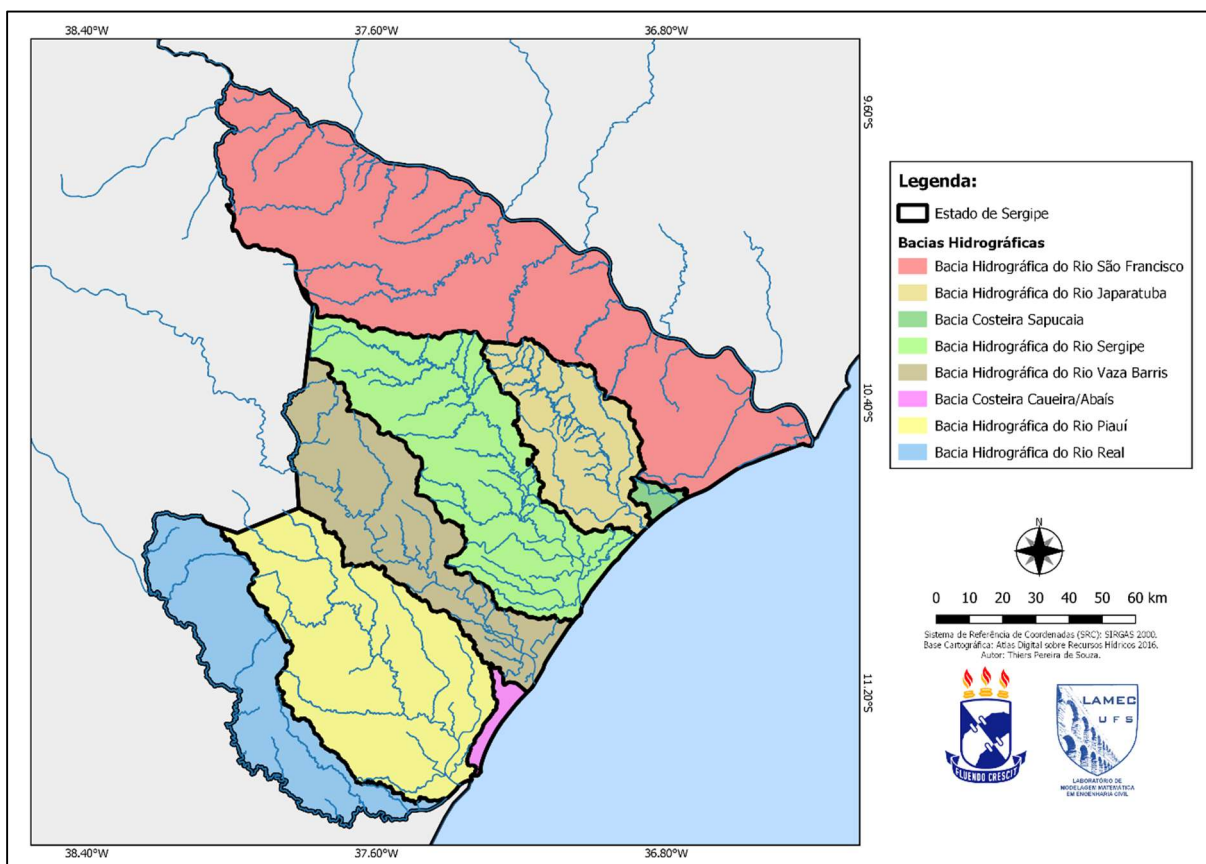


Fonte: Kousky (apud Cavalcanti et al., 2015)

2.1.2 Características Espaciais e Climáticas de Sergipe

Sergipe é um dos estados que compõem o NEB e está compreendido entre as coordenadas de latitudes sul 9°31' e 11°34'' e longitude oeste 36°25' e 38°14'' (DINIZ et al., 2014) (Figura 3). Possui área territorial de 21.938,184 km² e população estimada de 2.338.474 habitantes (BRASIL 2020, 2021).

Figura 3. Estado de Sergipe e suas principais bacias hidrográficas.



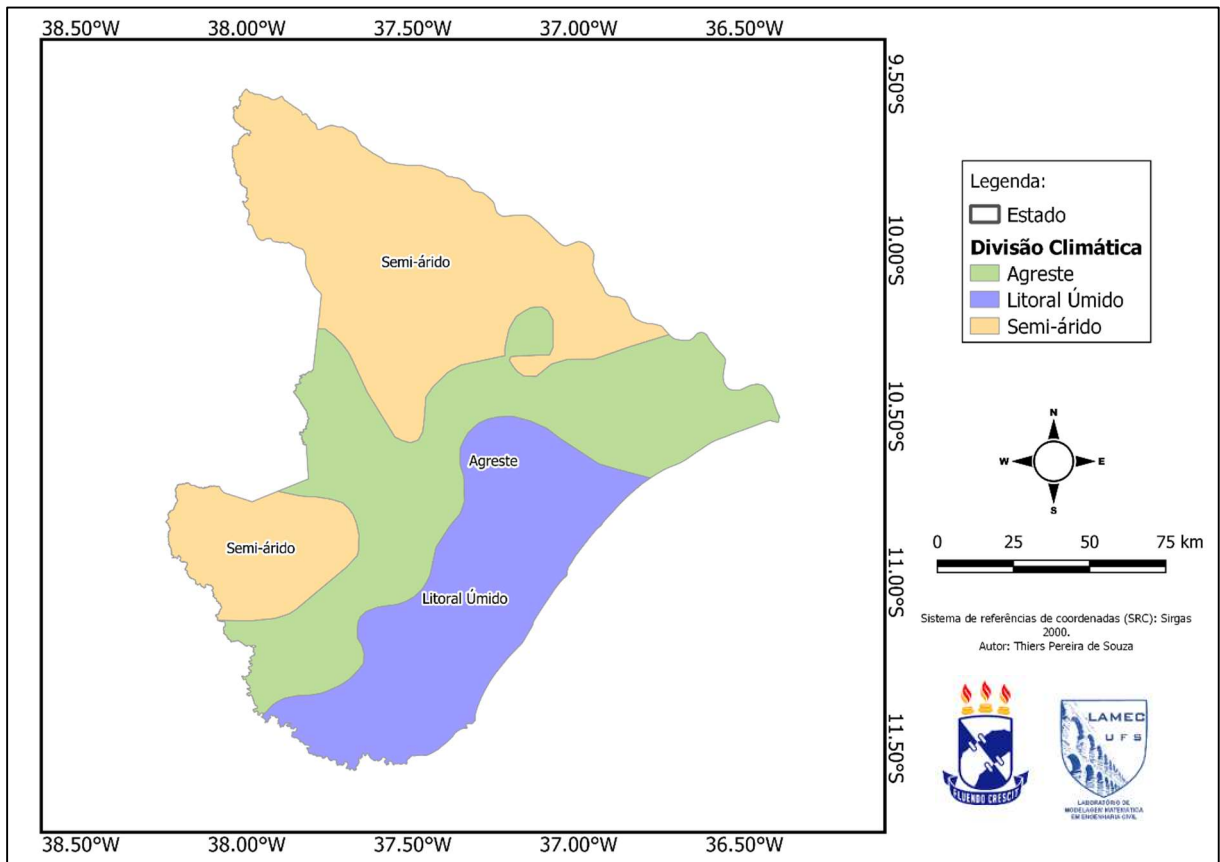
Fonte: Base cartográfica: Atlas Digital Sobre Recursos Hídricos (2016). Mapa: Produzido nesta pesquisa (2023).

No Plano Estadual de Recursos Hídricos de Sergipe (PERH-SE, 2010) o Estado é dividido nas seguintes regiões climáticas: semiárido, com precipitações entre 500 e 900 mm; agreste com precipitações entre 900-1300 mm e litoral úmido com precipitações variando entre 1300 e 1700 mm (Figura 4).

Além disto, o estudo realizado por Santos e Sousa (2018), mostrou através técnicas de análise multivariada, que a precipitação no Estado se concentra entre os meses de março e outubro.

O regime pluviométrico nessa região deve-se muito à atuação dos sistemas meteorológicos, que no mínimo são 6 (seis): a ZCIT, os VCAN, brisas terrestres e marítimas e as oscilações de 30-60 dias, os quais acabam atuando de forma conjunta ou em períodos distintos (PERH-SE, 2010).

Figura 4. Divisão climática de Sergipe.



Fonte: Base cartográfica: Atlas Digital Sobre Recursos Hídricos (2016). Mapa: Produzido nesta pesquisa (2023).

2.2 COMPORTAMENTO DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS

2.2.1 Aspectos Gerais

O entendimento do comportamento das variáveis que compõem o ciclo hidrológico é de suma importância para a gestão de recursos hídricos. Contudo a análise dessas variáveis pode ser uma tarefa complexa, pois o seu comportamento está associado a diversos fatores como: variações climáticas regionais e globais, alterações no uso e ocupação do solo (desmatamento, reflorestamento, impermeabilização, urbanização, queimadas etc.), entre outros (RIBEIRO, 2019). Esse conhecimento é fundamental para atividades de gestão, manejo, tomada de decisão, racionalização, preservação dos recursos hídricos, dimensionamento de estruturas hidráulicas para controle de inundação, drenagem urbana, estudos agrícolas e ambientais e modelagem hidrológica (RIBEIRO et al., 2021; SANTOS, 2016; SILVA, 2018; MELLO E VIOLA, 2013).

Tais análises são realizadas tendo como base as séries temporais (históricas) de dados. Estas são uma sequência de dados obtidos em determinado intervalo de tempo e durante um período específico (SANTOS, 2016). As séries hidrológicas registram o comportamento das variáveis hidrológicas, que podem ser, por exemplo: o total diário de uma precipitação, o total de evaporação de um reservatório, a vazão média diária de um rio, dentre outros inúmeros exemplos. Estas variáveis estão associadas a processos estocásticos, descritas por distribuições de probabilidade e consideradas variáveis aleatórias. Cabe ressaltar que estas séries correspondem a amostras finitas de uma população, e que o objetivo dos estudos científicos é extrair, com auxílio de métricas estatísticas, a partir das amostras, informações que sejam válidas para toda a população de dados dentro de uma amplitude de confiabilidade (NAGHETTINI e PINTO, 2007).

2.2.2 Análise Estatística

Na maior parte das aplicações da hidrologia estatística, a amostra de dados deve ter como características a estacionariedade e a homogeneidade. A primeira é tida como um estado de equilíbrio da série, ou seja, as propriedades estatísticas não se alteram ao longo do tempo. Já quando tal premissa não é atendida, a série é dita não estacionária. A não estacionariedade pode ser de 3 (três) tipos: tendências, saltos ou periodicidades (ciclos) ao longo do tempo. As tendências são associadas a alterações graduais, como por exemplo uma urbanização lenta. Os saltos estão ligados à mudanças bruscas, como por exemplo a construção de uma barragem, que levando em consideração a existência de uma estação fluviométrica a jusante da mesma, fará com que a série seja não-estacionária. Os ciclos podem estar relacionados à flutuações climáticas, de difícil detecção, pois necessitam de longos registros de dados (NAGHETTINI e PINTO, 2007; RIBEIRO et al., 2021; DETZEL, 2015).

Em suma, na maior parte das vezes, analisar a estacionariedade é tentar identificar tendências, que geralmente estão associadas com atividades antrópicas ou mudanças climáticas no contexto da bacia hidrográfica (DETZEL, 2015).

No que se refere a homogeneidade de uma série, avalia-se o padrão de variabilidade em torno de um valor médio, que é único e idêntico ao longo do tempo, sendo que as informações são provenientes de uma única população. Já em séries não homogêneas as observações são extraídas de populações distintas no tempo (que converge com o conceito de séries não estacionárias) ou nos mecanismos de causa (NAGHETTINI e PINTO, 2007; DETZEL, 2015).

Esses comportamentos podem ser difíceis de identificar levando em consideração o tamanho da série de dados. Para isto pode-se recorrer a testes de hipóteses específicos para entender tais comportamentos.

Dentre os diversos métodos existentes, serão abordados neste item os testes mais usuais para avaliação do comportamento de séries de dados hidrológicas, dado que a detecção de mudanças no comportamento destas pode ser indicativo de alterações físicas e climáticas na região de estudo (TUCCI, 2005).

a) Teste de Spearman

Teste não paramétrico, o teste de Spearman é utilizado na análise de tendências (um dos tipos de não-estacionariedade) de séries hidrológicas. A hipótese nula (H_0) indica que a série não apresenta tendência temporal e a hipótese alternativa (H_1), ao contrário, indica a existência de tendência de crescimento ou decrescimento (AHMAD et al., 2015).

O teste de Spearman conforme descrito por NERC (1975, apud NAGHETTINI e PINTO, 2007) tem como base o coeficiente “rs” dado por:

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{t=1}^n (m_t - T_t)^2}{N^3 - N} \quad (1)$$

em que:

m_t = Ordem de classificação crescente dos elementos

T_t = Ordem da ocorrência do elemento no tempo

N = Número de elementos da amostra

A hipótese nula (H_0) é rejeitada caso o valor absoluto da variável de teste T seja maior que o valor crítico, conforme a equação 2:

$$|T| > Z_{1-\frac{\alpha}{2}} \quad (2)$$

em que:

Z = Variável aleatória da distribuição normal padrão

α = Nível de significância

T é dado pela Equação 3:

$$T = \frac{rs}{\sqrt{\frac{1}{N-1}}} \quad (3)$$

b) Teste de Mann-Kendall

Esse teste não paramétrico também é aplicado para detectar tendências estatisticamente significativas. A hipótese nula (H_0) é que não houve tendência estatisticamente significativa ao longo do tempo, e a alternativa (H_1) considera tendências estatisticamente significativas de aumento ou diminuição ao longo do tempo (AHMAD et al., 2015). As equações 4 a 7 são utilizadas para calcular as estatísticas S , $V(S)$ e Z .

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(X_j - X_i) \quad (4)$$

$$\text{sgn}(X_j - X_i) = \begin{cases} +1 & \text{se } (X_j - X_i) > 0 \\ 0 & \text{se } (X_j - X_i) = 0 \\ -1 & \text{se } (X_j - X_i) < 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$V(S) = \frac{1}{18} [n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q tp(tp-1)(2tp+5)] \quad (6)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{V(S)}} & \text{se } S > 0 \\ 0 & \text{se } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{V(S)}} & \text{se } S < 0 \end{cases} \quad (7)$$

em que:

X_i e X_j = são os dados da série histórica em ordem cronológica

n = é o tamanho da série histórica

tp = é o número de observações iguais no grupo p

q = número de grupo vinculados (conjunto de dados da amostra com o mesmo valor)

Valores positivos de Z indicam uma tendência crescente na série de dados hidrológicos e valores negativos de Z indicam uma tendência negativa. Quanto a hipótese nula, rejeita-se

caso $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$, indicando tendências estatisticamente significativas na série analisada (AHMAD et al., 2015).

c) Teste de Pettitt

O teste elaborado por Pettitt (1979) é um teste não paramétrico que consiste em verificar se duas amostras X_1, \dots, X_t e X_{t+1}, \dots, X_T pertencem a uma mesma população. Para isto, considera-se uma dada sequência de variáveis X_1, X_2, \dots, X_T e um ponto de mudança em t .

A hipótese nula (H_0) é que não há pontos de mudança na série, ou seja, $t = T$, e alternativamente, $H_1: 1 \leq t < T$. Os cálculos deste teste são apresentados nas equações 8 a 11.

$$D_{i,j} = \text{sgn}(X_i - X_j) \quad (8)$$

em que:

$$\text{sgn}(X_i - X_j) = 1 \text{ se } x > 0$$

$$\text{sgn}(X_i - X_j) = 0 \text{ se } x = 0$$

$$\text{sgn}(X_i - X_j) = -1 \text{ se } x < 0$$

Sendo assim a estatística $U_{t,T}$, para $1 \leq t < T$ é dada por:

$$U_{t,T} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=i+1}^T D_{i,j} \quad (9)$$

onde há uma possível mudança de direção no tempo t apontado pela estatística K_T :

$$K_T = \max_{1 \leq t < T} |U_{t,T}| \quad (10)$$

Logo, a hipótese nula será rejeitada se o p-valor do teste de Pettitt (Eq.11) for menor que o nível de significância (α). Ou seja, p-valor $< \alpha$ a hipótese de não haver uma mudança no instante t é rejeitada a um nível de significância α .

$$p - \text{valor} = 2 \exp\left(\frac{-6K_T^2}{T^3 + T^2}\right) \quad (11)$$

2.2.3 Estudos sobre o Comportamento da Precipitação e Evapotranspiração no NEB

Carvalho et al. (2020) fizeram uma análise de tendências da chuva e da temperatura no Nordeste do Brasil. Para isto utilizaram 45 (quarenta e cinco) estações do INMET, para o período de 1961 a 2017, sendo 14 (quatorze) na faixa litorânea, 14 (quatorze) na faixa de 150-300 km até 300 m de altitude, 5 (cinco estações) na faixa de 150-300 km acima de 300 m de altitude, 4 (quatro) na faixa de 400-600 km até 300 m de altitude, 8 (oito estações) na faixa de 400-600 km acima de 300 m de altitude. As análises de tendência foram investigadas através do teste estatístico de Mann-Kendall e de regressão. Nessa pesquisa percebeu-se que houve uma tendência de redução do número de dias de chuva na região do litoral (onde encontra-se o estado de Sergipe). Além disso, foi verificada tendência de redução na precipitação total anual do NEB. Cabe salientar que para o Estado foi utilizada apenas uma estação (Aracaju-SE).

Penereiro et al. (2017) analisaram as séries temporais de algumas variáveis, dentre elas a precipitação, em todas as regiões brasileiras. Os dados utilizados também foram provenientes do INMET e os testes estatísticos utilizados foram o de Mann-Kendall e de Pettitt. As análises mostraram que a precipitação foi a variável climática que mais acusou ausência de tendência (205 estações analisadas), sendo o Nordeste a região que mais apresentou estações nesse conjunto (88 estações).

Cruz et al. (2017) analisaram tendências na precipitação na região de atuação da EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) Tabuleiros Costeiros. Esta abrange, em sua área de atuação, 570 municípios nos estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Bahia. Diferentemente dos estudos anteriores, foram utilizadas estações hospedadas no portal Hidroweb da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) para realização das análises. As estações escolhidas possuíam ao menos 30 anos de dados e menos de 20% de falhas. As análises os levaram a concluir que a maior parte dos postos de chuva apresentou tendências de redução nos volumes precipitados.

Outras pesquisas, porém, em escalas municipais, foram desenvolvidas, a exemplo do trabalho de Santos (2016), que analisou as precipitações de Salvador e verificou uma tendência de redução no volume de chuva de 1961 a 2011. Ramos (2020), que estudou os dados de chuva da cidade de Aracaju e verificou tendências decrescentes na precipitação entre 1986 e 2018. Amorin (2020), ao estudar a região do Rio Grande do Norte, percebeu que a região litorânea teve tendência de aumento na precipitação ao contrário das outras regiões, durante o período de 1900 a 2014.

Sendo assim apesar dos estudos apresentados, percebe-se a falta de investigações detalhadas sobre a variável aqui citada para o estado de Sergipe como um todo.

Estudos sobre tendências da evapotranspiração no NEB vêm sendo realizados nos últimos anos. Rocha Júnior et al. (2020) analisaram a tendência dessa variável no NEB, fazendo uso de dados gradeados com alta resolução ($0,25^\circ \times 0,25^\circ$), entre os anos de 1980 a 2016. Os autores dividiram o NEB em 4 regiões. Eles perceberam uma tendência média de crescimento dos valores de evapotranspiração para os 4 (quatro) grupos analisados, sendo que 3 das 4 (regiões), as tendências positivas tiveram significância estatística. Porém ao espacializar as tendências da evapotranspiração no NEB, perceberam-se regiões com tendências positivas e outras com tendências negativas. Um exemplo da ocorrência desta última foi a região litorânea do Ceará até a Bahia, que apresentou tendência de -0,1 a -1,4 mm/ano.

Em escala local, Silva et al. (2018) avaliaram tendências na evapotranspiração potencial no estado de Alagoas, utilizando dados das estações meteorológicas do INMET para o período de 1961 a 2016. As tendências foram analisadas para os trimestres representativos das estações do ano e em nível anual, com auxílio da regressão linear e do teste estatístico de Mann-Kendall. Os autores encontraram tendências de decréscimos na evapotranspiração média diária no sertão, aumento no agreste e neutralidade no litoral.

Cabral Júnior et al. (2019), também em escala local, avaliaram a evapotranspiração mensal, anual e interdecadal em Juazeiro/BA, Petrolina/PE utilizando dados diários fornecidos pela EMBRAPA Semiárido, para o período de 1976 a 2014. Com auxílio de testes estatísticos, perceberam declínios da evapotranspiração tanto em Juazeiro como em Petrolina, bem como indicou que as tendências iniciaram aproximadamente na década de 90.

Outros estudos foram realizados no NEB, contudo não foram encontrados até então estudos sobre tendências específicos para o estado de Sergipe.

2.2.4 Indicadores Climáticos baseados na Precipitação e na Evapotranspiração

Além da análise das variáveis do ciclo hidrológico isoladamente, torna-se interessante verificar a interação entre as mesmas e o seu reflexo sobre o meio ambiente. Na busca desta compreensão, pode-se recorrer a índices climáticos uma vez que estes podem ajudar no entendimento do clima, sua variabilidade, assim como na elaboração de políticas públicas quanto ao uso eficiente dos recursos hídricos em seus usos múltiplos (agricultura, abastecimento humano, produção de energia etc.) (CABRAL JÚNIOR E BEZERRA, 2018).

Um importante índice é o de aridez, ou IA, o qual é baseado na precipitação e na evapotranspiração. No seu cálculo são utilizadas séries de longo prazo, significando que ele é capaz de refletir as características climáticas facilitando sua compreensão. Além disso o IA também é utilizado para monitorar áreas suscetíveis à desertificação. A desertificação é definida como sendo a deterioração de áreas em zonas áridas, semiáridas, subúmidas secas, devido a vários fatores, dentre eles: variações climáticas e antrópicas (BOHN, 2020; MATALLO JÚNIOR, 2003). Em suma, este índice é aplicado tanto para estudos climáticos bem como para identificar áreas suscetíveis à desertificação.

Um das formulações do IA foi proposta em 1941 por Thornthwaite, e que mais tarde foi ajustada por Penmann em 1953 (MATALLO JÚNIOR, 2003). Os autores indicam que o grau de aridez de uma região depende da quantidade proveniente da chuva (P) e da perda por meio da evaporação e transpiração (ETP), como mostrado na equação 12.

$$IA = \frac{P}{ETP} \quad (12)$$

em que:

P = Precipitação total anual;

ETP = Evapotranspiração potencial anual;

Nos Quadros 1 e 2 são mostrados respectivamente, os intervalos de suscetibilidade à desertificação e a classificação climática segundo o IA.

Quadro 1. Suscetibilidade à desertificação.

Suscetibilidade à desertificação	Índice de Aridez (IA)
Muito Alta	0,05 - 0,2
Alta	0,21 - 0,5
Moderada	0,51 - 0,65

Fonte: Matallo Junior (2003).

Quadro 2. Índice de Aridez para as diversas classes climáticas.

Classificação Climática	Índice de Aridez (IA)
Hiperárido	<0,05
Árido	0,05 - 0,2
Semiárido	0,21 - 0,5
Subúmido Seco	0,51 - 0,65
Subúmido e Úmido	>0,65

Fonte: Matallo Junior (2003).

A formulação proposta por Thornthwaite é um dos critérios técnicos e científicos utilizados no Brasil para delimitação da região semiárida segundo a resolução N°150, de 13 de dezembro de 2021.

2.3 DELIMITAÇÃO DO SEMIÁRIDO

Historicamente, a região semiárida iniciou como sendo a área correspondente ao Polígono das secas, em 1936. Em 1968, foi conferida à Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE) a responsabilidade de declarar os municípios pertencentes ao então Polígono das Secas. Em 1988, o Semiárido brasileiro é mencionado pela nova Constituição Federal, prevendo recursos para região. No ano de 1995, ocorreu a primeira atualização dessa região, estabelecendo que nela seriam incluídos os municípios com precipitação pluviométrica média anual igual ou inferior a 800 mm. Posteriormente, novas delimitações foram estabelecidas e novos critérios foram criados (SUDENE 2021). Em 2021, foi publicada a delimitação preliminar fazendo uso dos critérios trazidos na resolução N° 107, de 27 de julho de 2017.

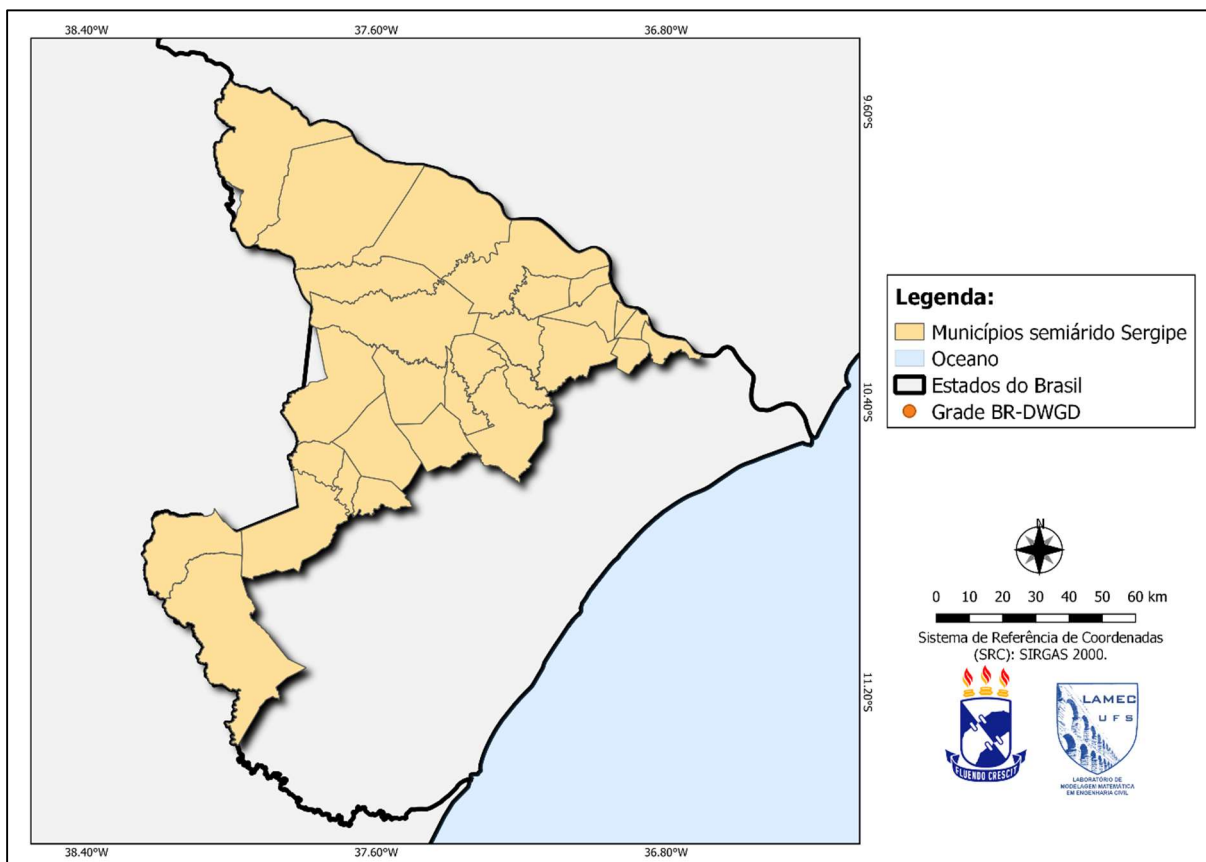
Nesta, são definidos os critérios, que são:

- a) Precipitação pluviométrica média anual igual ou inferior a 800 mm;
- b) Índice de Aridez de Thornthwaite igual ou inferior a 0,5 mm;
- c) Percentual de déficit hídrico igual ou superior a 60% considerando todos os dias do ano.

Os critérios acima descritos foram selecionados considerando principalmente: a compatibilidade com os objetivos, a consistência técnica, a objetividade e a operacionalidade. Além desses, também foram levados em consideração a qualidade das séries históricas e o impacto dessas na delimitação. Isso posto, ao analisar o terceiro critério (alínea c) o relatório de 2021 da SUDENE cita que ele é realizado a partir de um balanço hídrico diário, no qual são feitas considerações quanto às características do solo no tocante à capacidade de armazenamento e à condutividade. Os dados meteorológicos são provenientes de estações climáticas do INMET, INPE e CEMIG. A partir daí, são realizadas estimativas da variação diária de armazenamento de água no solo. Por fim, calcula-se o número de dias com déficit hídrico. Logo, pode-se notar que a metodologia adotada no referido critério tem um certo grau de dificuldade em sua operacionalização, além de estimar parâmetros de armazenamento.

A Figura 5 ilustra a zona semiárida consolidada em 2017 para o Estado de Sergipe.

Figura 5. Semiárido sergipano segundos os critérios da resolução N° 107, de 27 de julho de 2017.



Fonte: Base cartográfica: Atlas Digital Sobre Recursos Hídricos (2016) e SUDENE (2017).

Mapa: Produzido nesta pesquisa (2023).

2.4 REDE HIDROMETEROLOGICA NACIONAL (RHN)

A rede de monitoramento no Brasil vem desde o século XIX, havendo registros de estações na base dados da ANA desde o ano de 1855 (estação Morro Velho, em Minas Gerais). O governo federal, entre 1900 e 1920, incorporou o monitoramento delegando-o ao serviço público federal, onde foram criadas instituições com tal finalidade (HIDROWEB, 2022).

Atualmente a ANA é a responsável por promover a coordenação da Rede Hidrometeorológica Nacional (RNH), em articulação com órgãos e entidades públicas ou privadas que a integram como estabelece a Lei N° 9.984, de julho de 2000, em seu artigo 4º, inciso XIII.

A rede é formada essencialmente por estações pluviométricas, que fazem a aquisição de dados de chuva; fluviométricas que estão associadas aos rios, ou seja, nível e vazão, principalmente; e meteorológicas ou climatológicas, que estão associadas a variáveis climáticas

como velocidade do vento, umidade relativa do ar, radiação solar, pressão atmosférica, entre outras (DIAS, 2014).

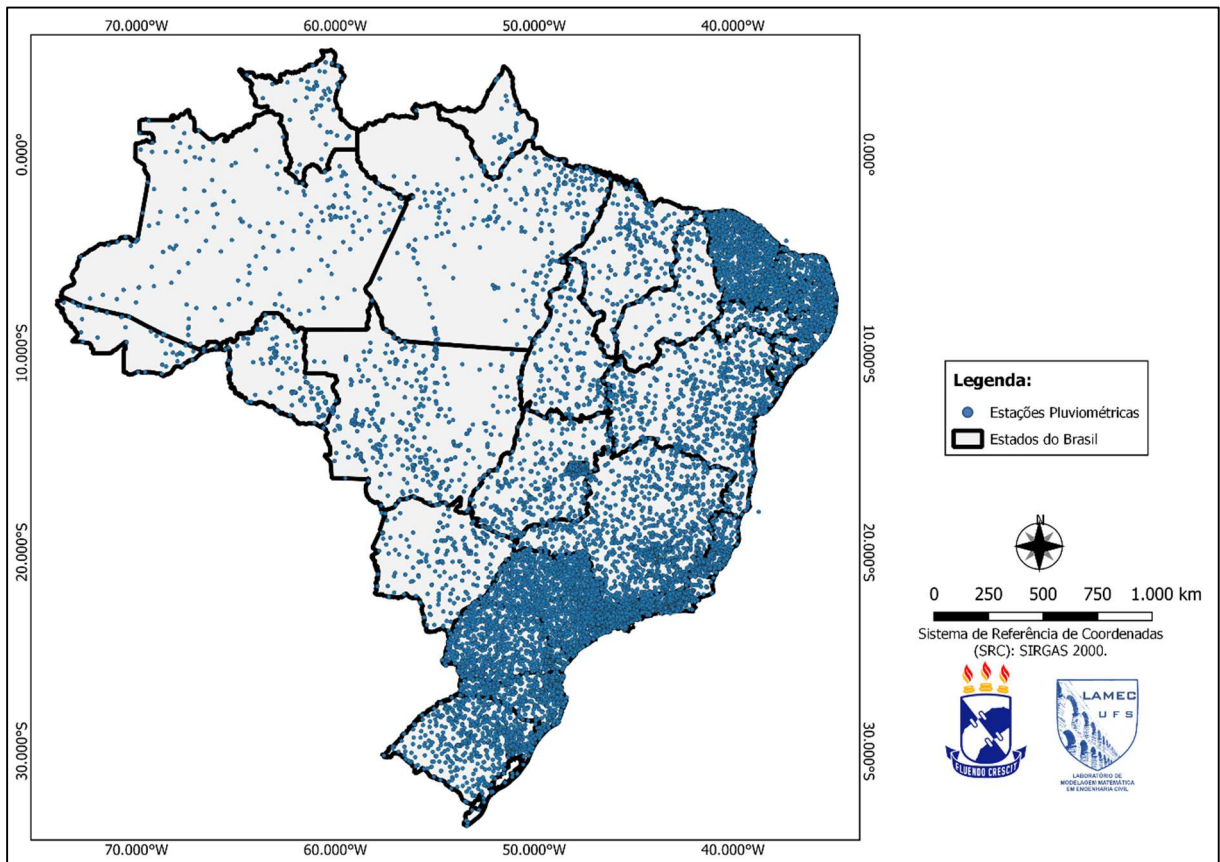
A Tabela 1 e a Figura 6 quantificam e espacializam as estações pluviométricas da RNH respectivamente.

Tabela 1. Quantitativo de estações pluviométricas no Brasil por região.

Rede Pluviométrica Nacional							
Região	Área (km²)	ANA		Outras entidades		Total	Densidade (km² / Est.)
		ABS	%	ABS	%		
Centro-Oeste	1.593.000	393	35	723	65	1.116	1.400
Nordeste	1.548.000	642	18	3.024	82	3.666	400
Norte	3.868.000	533	59	370	41	903	4.300
Sudeste	925.000	755	16	3.885	84	4640	200
Sul	578.000	485	19	2.018	81	2.503	200
Total	8.512.000	2808	22	10.020	78	12.828	700

Fonte: Silva (2021, adaptado).

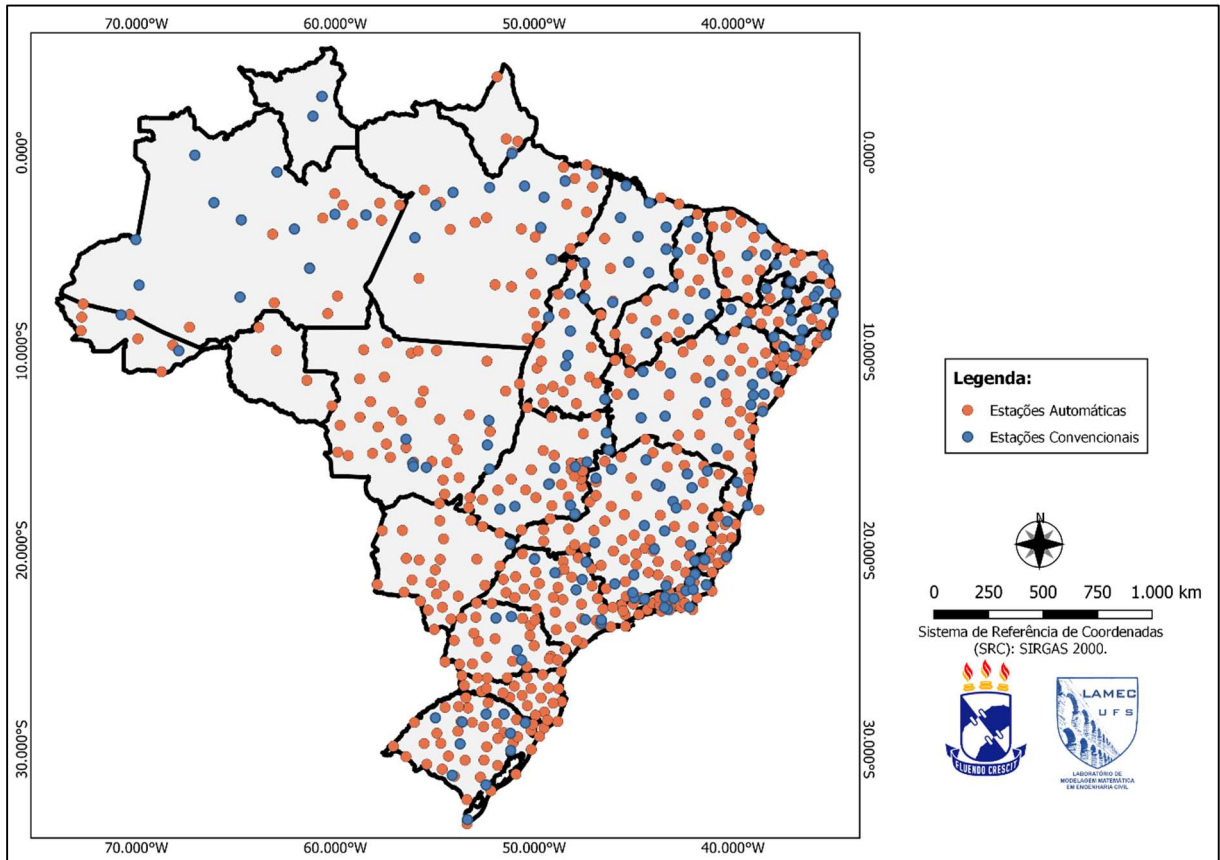
Figura 6. Espacialização das estações pluviométricas no Brasil.



Fonte: Base cartográfica: Atlas Digital Sobre Recursos Hídricos (2016) e Metadados ANA (2019). Mapa: Produzido nesta pesquisa (2023).

Quanto às estações meteorológicas, uma das principais entidades operadoras é o INMET. Segundo o catálogo do INMET (consulta feita em março de 2022), existe um quantitativo de 170 estações convencionais e 571 estações automáticas em operação (Figura 7).

Figura 7. Estações meteorológicas operadas pelo INMET.



Fonte: Base cartográfica: Atlas Digital Sobre Recursos Hídricos (2016). Dados: Catálogo estações INMET. Mapa: Produzido nesta pesquisa (2023).

Apesar do quantitativo de estações pluviométricas e meteorológicas ser relativamente alto, pode-se observar que algumas regiões possuem maiores densidades de estações do que outras. Esse é um problema histórico no Brasil. Dias (2014) comenta que antigamente a rede hidrometeorológica era implementada com objetivo de atender a demandas específicas, ou seja, a instalação não levava em consideração, por exemplo, a existência de outras estações na mesma região, causando assim um desbalanço, que pode ser verificado de certa forma nas Figuras 6 e 7.

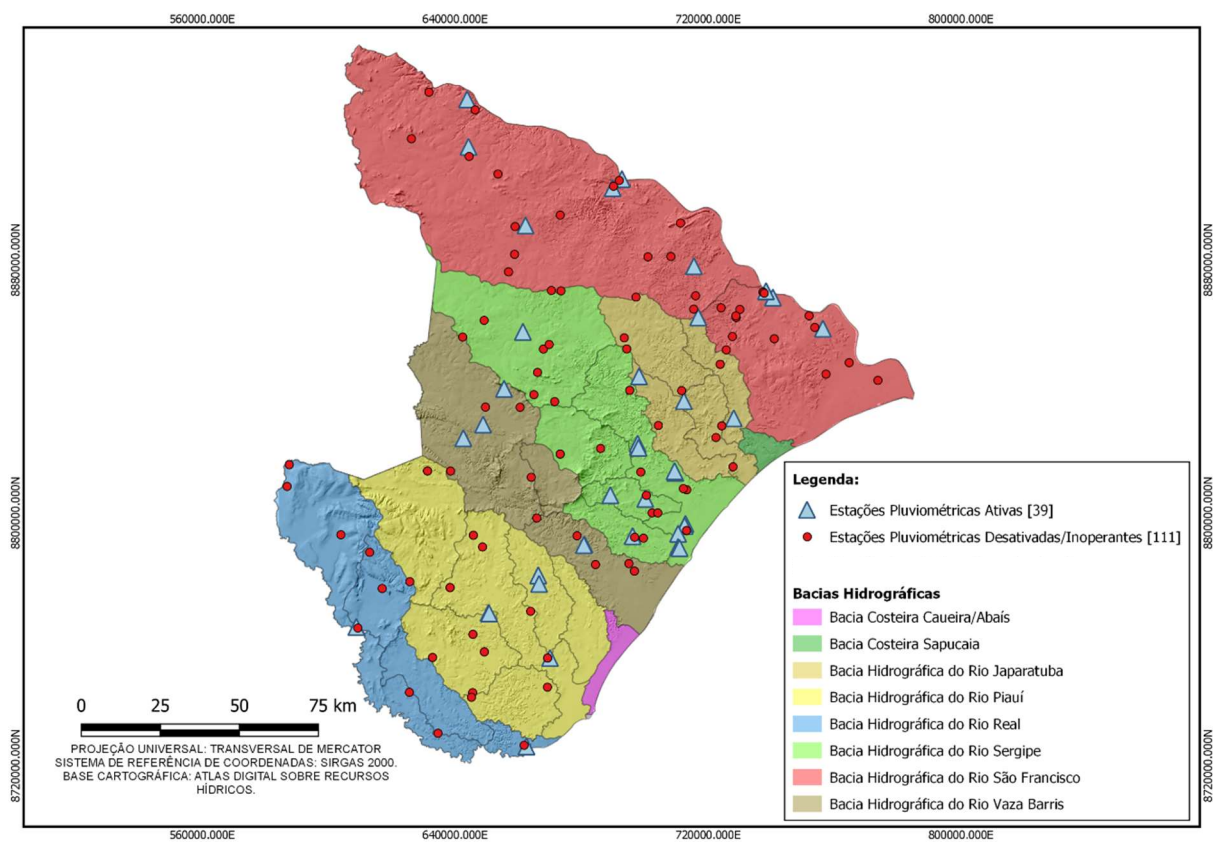
2.4.1 Rede Hidrometeorológica do Estado de Sergipe

Em Sergipe, o monitoramento das variáveis climáticas iniciou-se em 1912. Atualmente, são responsáveis pelo monitoramento hidrometeorológico do Estado diversas instituições federais e estaduais, a citar: ANA, INMET, EMDAGRO, Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), Companhia de Desenvolvimento dos Vales do

São Francisco e do Parnaíba (CODEVASF), Superintendência Especial de Recursos Hídricos e Meio Ambiente (SERHMA), Companhia Hidrelétrica do São Francisco (CHESF), Associação dos Concessionários do Distrito de Irrigação do Platô de Neópolis (ASCONDIR-SE), entre outras (SOUZA et al., 2021a).

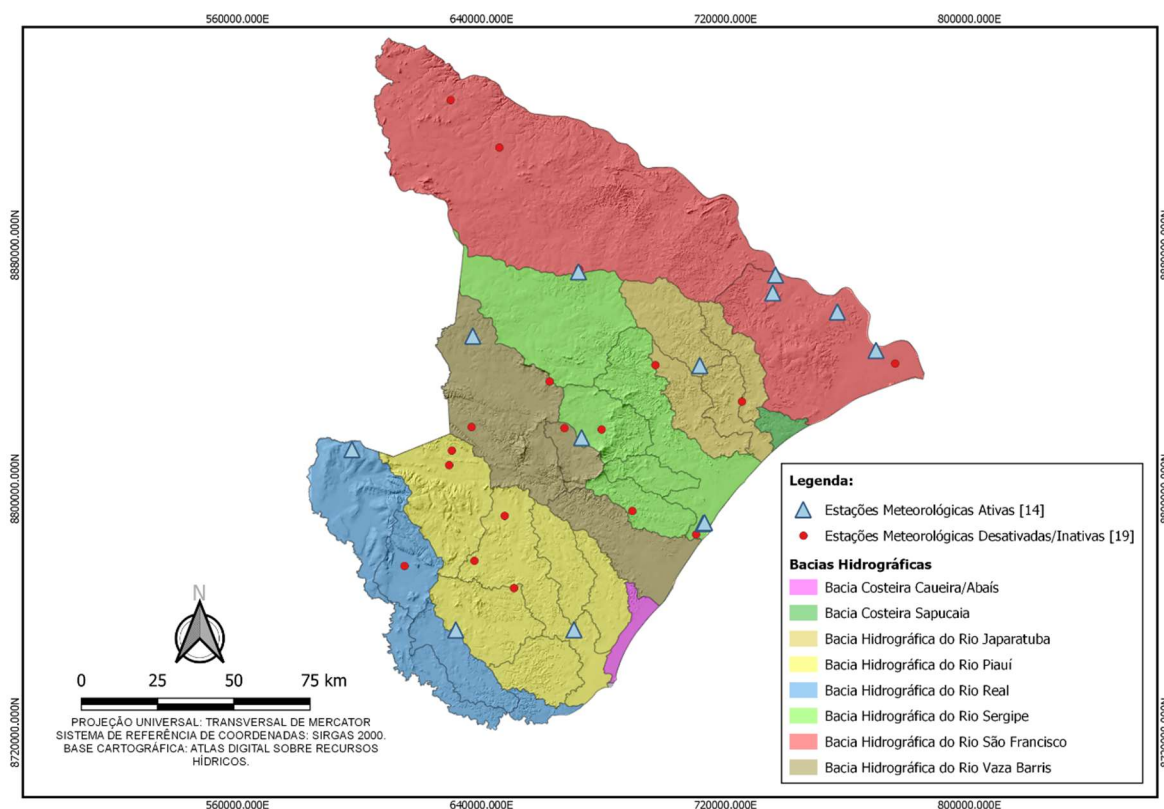
Quanto ao quantitativo e a espacialização dos pluviômetros e das estações meteorológicas, Souza et al. (2021a) trazem esse panorama a partir das Figuras 8 e 9, inclusive discriminando por bacia hidrográfica.

Figura 8. Espacialização das estações pluviométricas no estado de Sergipe.



Fonte: Souza (2021a).

Figura 9. Espacialização das estações climatológicas do estado de Sergipe.



Fonte: Souza (2021a).

Assim como foi trazido no tópico relativo ao contexto nacional, em Sergipe acontece algo semelhante que é a falta de uniformidade na distribuição das estações ao longo do Estado, uma vez que certas regiões apresentam um bom monitoramento ao contrário de outras regiões. Para comprovar tal fato, Souza (2021b) realizou estudos na bacia do Rio Sergipe, e verificou que segundo os critérios da Organização Mundial de Meteorologia (OMM) a rede deve ser mais bem dimensionada, tanto para quantidade quanto para a distribuição espacial das mesmas.

2.5 SISTEMAS DE INFORMAÇÕES SOBRE RECURSOS HÍDRICOS

Conhecendo um pouco do panorama da RHN, é conveniente saber como ter acesso aos dados que são coletados pela rede.

Neste sentido a “Lei das Águas” (Lei Nº 9433, de 8 de janeiro de 1997) instituiu em seu artigo 5º, inciso VI, como um dos seus instrumentos, o Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos, o qual tem como um dos seus princípios básicos o acesso aos dados garantidos à toda sociedade.

Uma das ferramentas mais conhecidas e importantes desse sistema é o portal HidroWeb gerenciado pela ANA, o qual oferece acesso ao banco de dados que contém todas as informações coletadas pela RNH, compilando dados de: nível, vazão, chuva, dados climatológicos, qualidade da água e sedimentos. Outras ferramentas, também da ANA, são o portal hidrotelemetria, com dados em tempo real, e o Hidroweb *mobile*, que permite o acesso a dados das estações aqui citadas via celular (HIDROWEB, 2022; SILVA, 2021).

Outros sistemas com dados hidrometeorológicos em escala nacional e não menos importantes são: o portal do INMET²; o portal do SINDA/INPE³; o sistema da CHESF⁴; CEMADEN⁵.

Já para o estado de Sergipe, as informações hidrometeorológicas são fornecidas no Portal de Recursos Hídricos de Sergipe, vinculado à Secretaria de Estado do Desenvolvimento Urbano e Sustentabilidade (SEDURBS)⁶.

2.6 BASE DE DADOS GRADEADOS

As abordagens anteriores ajudaram a entender problemáticas relativas à densidade de estações no contexto nacional e no estado de Sergipe. Na sequência foram mostrados os principais sistemas de informações para acesso aos dados dessas estações. Feito isto, vale uma outra reflexão: o único problema dessa rede é a distribuição irregular das estações? A resposta é não. As séries de dados climáticos podem apresentar: falhas, curto período de observação, erros de observação, erros de preenchimento das fichas campo, erros devido à danificação do aparelho, crescimento de vegetação que pode ocasionar obstrução ao local de medição, entre outros (TUCCI, 2020; CARVALHO et al., 2019).

O conhecimento dos fatos supracitados é de extrema importância pois, para entender possíveis tendências nas variáveis climáticas, bem como seus impactos na gestão de recursos hídricos e na agricultura, é necessário ter disponíveis séries de dados confiáveis e representativas (JONES et al., 2003 E STEDUTO et al., 2009, apud XAVIER et al., 2016).

Para contornar tais situações, pode-se recorrer a dados trabalhados estatisticamente, através de processos de reanálise e interpolação, onde são gerados pontos com informações

² Portal INMET. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/>

³ Portal SINDA/INPE Disponível em: <http://sinda.crn.inpe.br/PCD/SITE/novo/site/index.php>

⁴ Portal CHESF. Disponível em:

<https://www.chesf.gov.br/SistemaChesf/Pages/GestaoRecursosHidricos/GestaoRecursosHidricos.aspx>

⁵ Portal CEMADEN. Disponível em: <https://www.gov.br/cemaden/pt-br>

⁶ Portal de Recursos Hídricos de Sergipe: <https://www.sedurbs.se.gov.br/portalrecursoshidricos/>

únicas, simulando um posto de coleta de dados hidrometeorológicos, aumentando assim a quantidade de informações no tempo e espaço (ABREU et. al, 2019).

Nesse sentido, podem-se citar alguns produtos, como, por exemplo, a base gradeada do Laboratório de Pesquisa do Sistema Terrestre (*Earth System Research Laboratory – ESRL*), o qual possui dados diários de precipitação para a América do Sul de 1940 a 2012, cujas fontes de dados são estações pluviométricas e sua resolução espacial é de 1° e 2,5° (LIEBMANN e ALLURED, 2005). As fontes de dados no Brasil para este produto são: da ANA, da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE), da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), da SUDENE e do Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR).

Prakash et al. (2014) e Harris et al. (2020) citam outros produtos em escala mundial para obtenção de dados gradeados de precipitação, tais como o *Climate Prediction Center (CPC)*, o qual possui 0,5° de resolução espacial com dados diários de precipitação de 1979 até os dias atuais; e o *Climate Research Unit (CRU)*, o qual também possui 0,5° de resolução e dados mensais de precipitação abrangendo o período de 1901 a 2018.

Outra base que vem se consolidando, especificamente para o Brasil, desde o ano de 2016, é a produzida por Xavier et al. (2016) ou *Brazilian Daily Weather Gridded Data (BR-DWGD)*. A mesma foi construída a partir de dados de pluviômetros e estações climatológicas sob operação da ANA e INMET. Esta grade, atualmente, tem como principais características: resolução espacial de 0,1°, resolução temporal diária e cobertura para o período de janeiro de 1961 a julho de 2020. Os dados fornecidos por ela são de precipitação e de evapotranspiração potencial de referência (ET_o) e outras 5 (cinco) variáveis (temperatura máxima, temperatura mínima, radiação solar, velocidade do vento a 2 (dois) metros de altura e a umidade relativa), necessárias para o cálculo da evapotranspiração pelo método de Penman-Montheith.

Quanto aos métodos de interpolação utilizados pelos autores, em 2016, foram: a) média aritmética, b) *splines*, c) vizinho natural, d) ponderação de distância inversa, e) ponderação de distância angular e f) krigagem ordinária. O método de interpolação escolhido foi àquele com maior eficiência após a realização da validação cruzada. Na grade de 2022, entretanto, foram utilizados os métodos de interpolação da ponderação de distância angular e da ponderação de distância inversa e assim como na grade de 2016, foi realizada a validação cruzada para selecionar os melhores resultados (XAVIER et al., 2016; XAVIER et al., 2017; XAVIER et al. 2022).

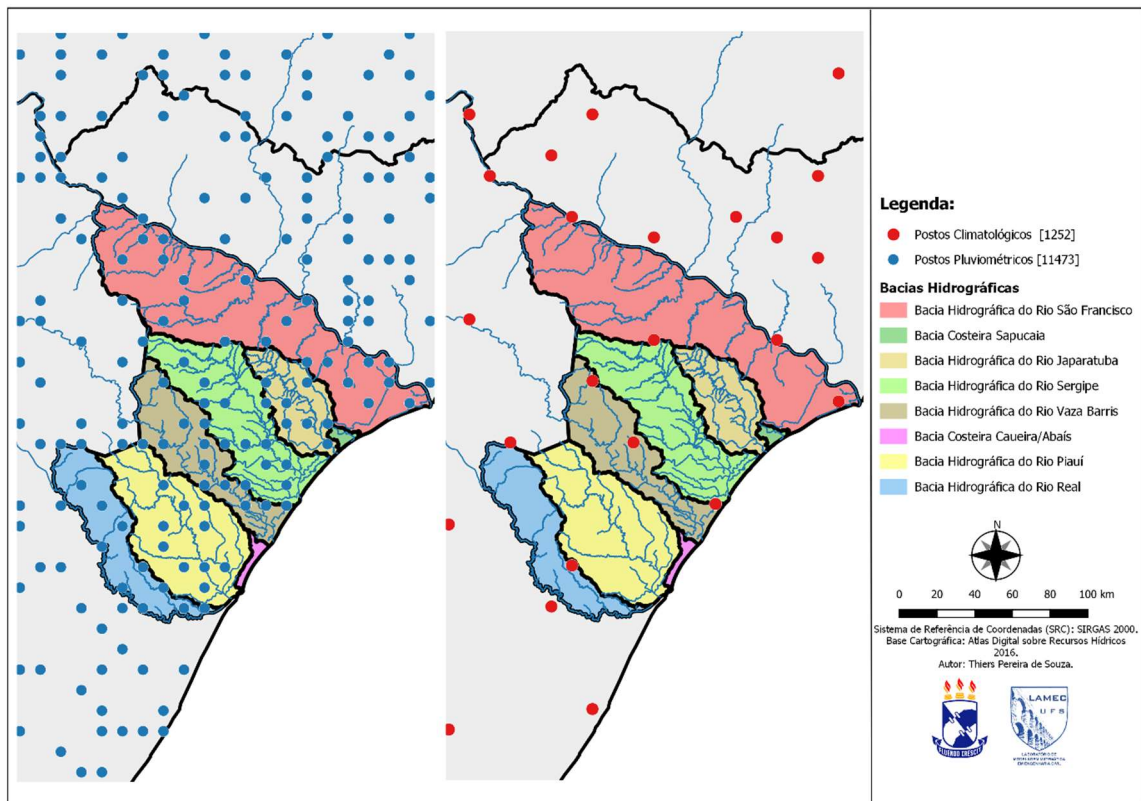
Diversos estudos climatológicos vêm sendo realizados em todo Brasil, inclusive no NEB a partir da base de Xavier et al. (2016). Abreu et al. (2019), por exemplo, utilizaram essa

base para verificar a variabilidade espacial e temporal da chuva na Bacia Hidrográfica do Rio Parnaíba. Cabral Júnior e Bezerra (2018) fizeram análises da evapotranspiração de referência e do IA para o NEB, fazendo uso da referida grade. Silva et al. (2019) avaliaram índices extremos climáticos para o NEB e Amazônia entre 1980 e 2013 também fazendo uso da grade de dados interpolados do Xavier et al. (2016). Como prova de verificar a eficiência desses dados, Barros et al. (2018) fizeram uma análise comparativa das precipitações diárias anuais registradas em 182 postos no NEB com os dados da grade de Xavier et al. (2016), e os resultados mostraram uma forte correlação (coeficiente de Pearson acima de 0,74) para todas as regiões em estudo.

Apesar dos trabalhos anteriores comprovarem bons resultados da referida grade, deve-se ter ciência também das suas limitações. Como forma de deixar transparente essa questão, Xavier et al. (2016) disponibilizam a lista de estações utilizadas para a geração da grade de dados interpolados, bem como dois tipos de controle em grade como forma de possibilitar pesquisadores avaliar a qualidade da estimativa.

Na Figura 10 são mostrados os postos de monitoramento utilizados no estudo de Xavier et al. (2022), tendo como foco o estado de Sergipe, área de estudo deste trabalho. Com esta figura busca-se ressaltar que, apesar da base ser contínua no tempo, sem falhas e com todos os pontos da grade possuindo dados para o mesmo intervalo de tempo (1961-2020), ela foi produzida a partir estações de monitoramento, em terra, com intervalos de operações distintos, como pode-se inferir através das Figuras 8 e 9. Logo, deve-se ter em mente que tal fato pode limitar a acurácia em alguns casos.

Figura 10. Estações pluviométricas e climáticas utilizadas para gerar a grade interpolada por Xavier et al. (2022).



Fonte: Produzido nesta pesquisa (2023).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Dada a importância de investigações climatológicas específicas para o estado de Sergipe, o presente estudo investigou o comportamento das variáveis climatológicas de precipitação (P) e evapotranspiração (ET_o), a partir da base de dados BR-DWGD. De forma adicional, também foi proposto um novo critério de delimitação do semiárido sergipano devido à complexidade do critério do déficit hídrico utilizado pela SUDENE elucidada no item 2.3.

A metodologia adotada para a investigação das variáveis climatológicas teve a seguinte estrutura:

1. Representação e seleção dos pontos da grade BR-DWGD com influência no estado de Sergipe;
2. Aquisição dos dados de P e ET_o;
3. Geração de séries de P e ET_o para cada bacia hidrográfica do estado de Sergipe;
4. Cálculo do Índice de Aridez (IA);
5. Definição do ano hidrológico;
6. Análises estatísticas das séries de P, ET_o e IA;
7. Produção de mapas e *shapefiles*;
8. Elaboração de *app* para dispositivos Android.

A metodologia para o novo critério para delimitação do semiárido de Sergipe foi estruturada da seguinte forma:

1. Aquisição dos dados de P e ET_o;
2. Balanço entre P e ET_o;
3. Percentual de balanço negativo entre P e ET_o;
4. Calibração e obtenção do percentual a ser adotado pelo critério;
5. Formalização do critério e delimitação do Semiárido Sergipano;

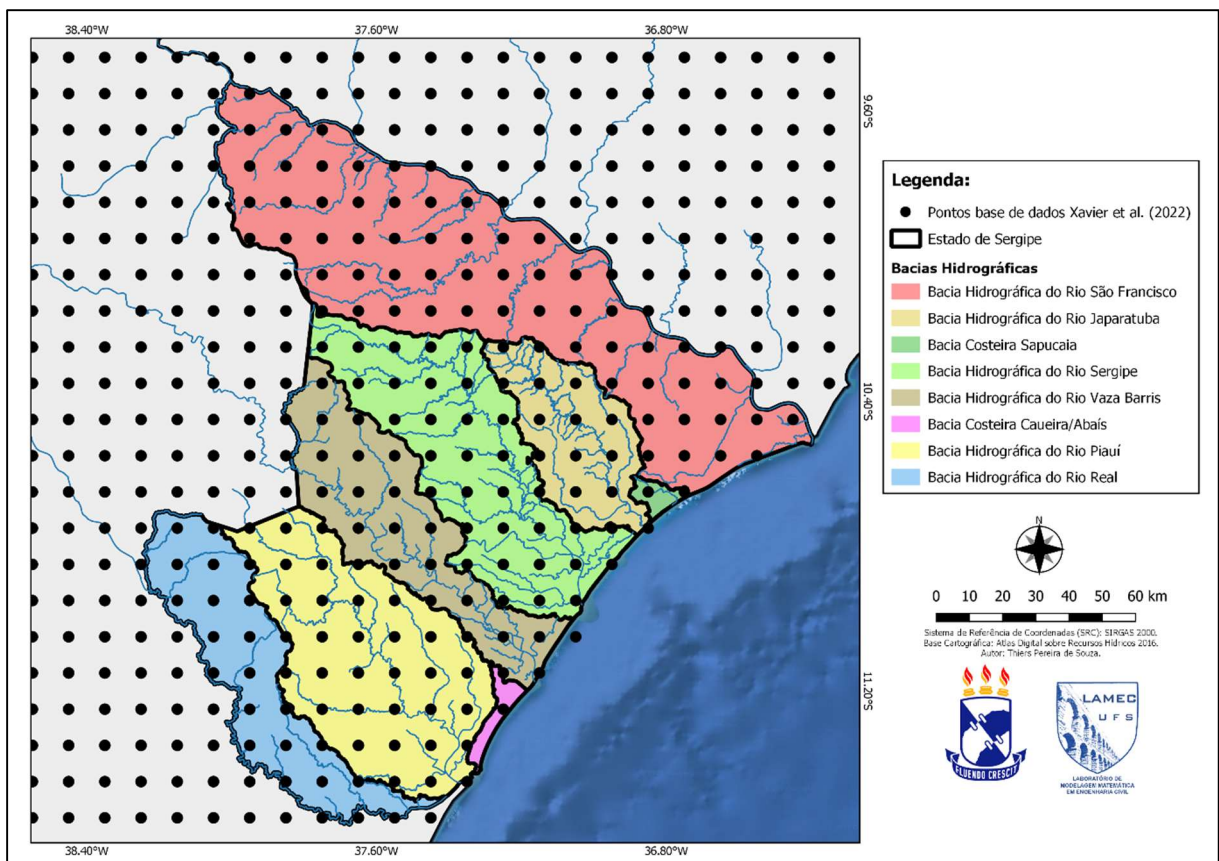
De forma a complementar, o estudo também realizou algumas comparações fazendo uso dos produtos obtidos pela nova metodologia para delimitação do semiárido, produtos desenvolvidos e em desenvolvimento pela SUDENE e dados de seca e estiagem da Superintendência Estadual e Defesa Civil (SUPDEC) do estado de Sergipe.

3.1 INVESTIGAÇÃO DAS VARIÁVEIS CLIMATOLÓGICAS EM SERGIPE

3.1.1 Representação e Seleção de Pontos

Conhecida a cobertura espacial (latitude: $33,85^{\circ}$ S – $5,35^{\circ}$ N e longitude: $73,85^{\circ}$ W – $34,85^{\circ}$ W) da base de dados BR-DWGD, bem como a resolução espacial ($0,1^{\circ} \times 0,1^{\circ}$), buscou-se representar a mesma, em forma de malha de pontos, com auxílio do QGIS, *software* livre de Sistema de Informação Geográfica (SIG) (Figura 11).

Figura 11. Representação espacial, em forma de pontos, da base de dados de Xavier et al. (2022).

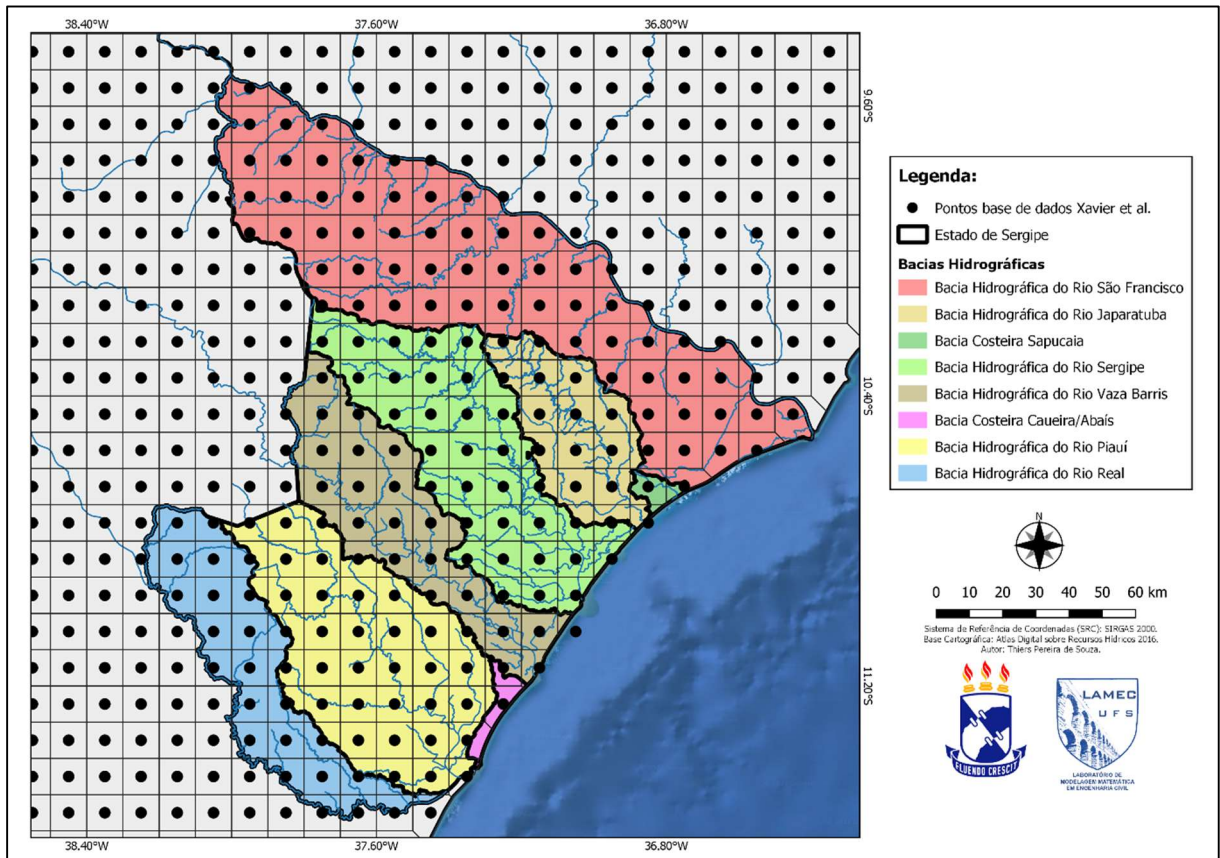


Fonte: Produzido nesta pesquisa (2023).

Na sequência, buscou-se identificar a área de influência de cada ponto da Figura 11, de forma a selecionar os pontos utilizados neste trabalho. Para tal fim, utilizou-se do método de Thiessen, amplamente utilizado na engenharia, geologia e hidrologia. Tal método, desenvolvido pelo meteorologista Alfred H. Thiessen, o qual utilizou a teoria dos diagramas de Voronoi, permite delimitar regiões ou áreas de influência, em forma de polígonos, dos pontos

considerados. Ou seja, um determinado polígono de Thiessen selecionado contém um ponto, e qualquer localização dentro do contorno desse polígono está mais próximo desse ponto do que qualquer outro ponto do diagrama (RICHTER et al. 2021; MARCIANO et al. 2017). A Figura 12 ilustra o procedimento.

Figura 12. Polígonos de Thiessen (Voronoi) para os pontos da base de dados gradeados.



Fonte: Produzido nesta pesquisa (2023).

Ao final desta etapa foram selecionados 218 (duzentos e dezoito) pontos que de alguma forma tinham influência para o estado de Sergipe.

Cabe ressaltar que a representação dada neste trabalho à grade dos referidos autores teve como objetivo tornar visual e maleável, em termos de manipulação, o produto de Xavier et al. (2022) uma vez que a grade, na realidade, é um conjunto de pixels, onde em cada pixel tem-se uma informação das variáveis descritas no item 2.5.

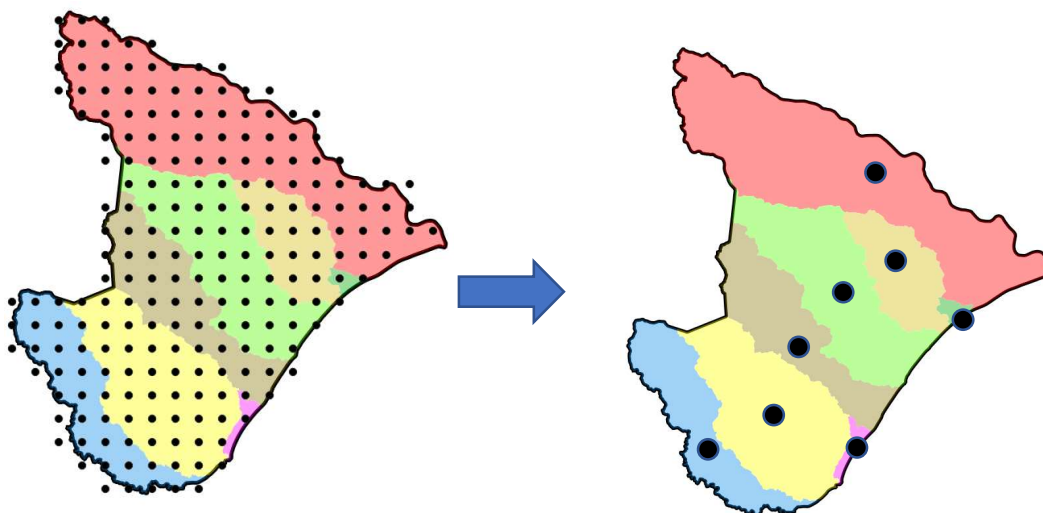
3.1.2 Aquisição dos Dados

Realizada a seleção dos pontos foram obtidos os dados climatológicos para cada um dos 218 (duzentos e dezoito) selecionados. Os dados obtidos foram relativos à precipitação (P) e à evapotranspiração (ET_o) ambos em escala diária para o período de 1961 a 2020. Para extração dos dados da base de dados BR-DWGD foi necessário uso de linguagem de programação. Fez-se uso nesta etapa da linguagem Python.

3.1.3 Geração de Séries Climatológicas por Bacia Hidrográfica

De forma a viabilizar as análises estatísticas posteriores, face ao grande quantitativo de pontos selecionados e na tentativa de se ter um maior sentido no que se refere à gestão de recursos hídricos, fez-se um agrupamento das séries de P e ET_o, a partir dos postos selecionados, para cada bacia hidrográfica do estado de Sergipe, utilizando para isto o método de Thiessen. Ao final, foram obtidas 16 séries para cada bacia (8 de precipitação e 8 de evapotranspiração). O procedimento aqui descrito encontra-se ilustrado na Figura 13.

Figura 13. Agrupamento dos pontos da grade BR-DWGD por bacia hidrográfica.



Fonte: Produzido nesta pesquisa (2023).

As séries produzidas (em escala diária) nessa etapa foram agrupadas em termos de total anual (Ex.: 1961, 1962...2019) e por trimestre mais úmido (TMU) e mais seco (TMS) ao longo dos anos. Neste trabalho, o trimestre mais úmido e o mais seco foram escolhidos como os três meses com maior e menor Média de Longo Termo (MLT) respectivamente. Isto é, caso a MLT

de precipitação, por exemplo, tivesse apontado que os meses mais chuvosos historicamente fossem os meses de MJJ (maio, junho e julho), a avaliação seria feita para esses meses ao longo dos anos (MJJ/61, MJJ62, ..., MJJ/19).

3.1.4 Cálculo do Índice de Aridez

A partir das séries obtidas na etapa anterior fez-se o cálculo do Índice de Aridez (IA), para cada bacia hidrográfica, tendo como objetivo classificar o clima ao longo dos anos bem como verificar a suscetibilidade à desertificação, tomando como base os critérios trazidos por Matallo Junior (2003).

3.1.5 Definição do Ano Hidrológico

Este trabalho considerou em suas análises o ano hidrológico ao invés do ano civil. Entende-se como ano hidrológico o período de 12 meses que se inicia com o período chuvoso e termina com o período seco (KICH et al. 2015). Esta consideração tem sua importância em regiões com sazonalidade acentuada, uma vez que tal consideração assegura a independência da série amostral (NAGHETTINI E PINTO, 2007).

3.1.6 Análises Estatísticas

Para as séries de P, ETo e IA foram realizadas análises estatísticas para retirar das amostras de dados informações com um nível de confiança que auxiliassem no entendimento do comportamento destas variáveis ao longo tempo. Para isto, realizaram-se testes de estacionariedade, através do teste de Spearman e Mann-Kendall, e teste para detecção de pontos de mudança, através do teste de Pettitt. Para todos os testes foi adotado um nível de significância α de 5%.

3.1.7 Mapas e Shapefiles

Uma das vantagens que os mapas possuem é a de possibilitar a avaliação e consulta espacializada das informações. Além disso, a confecção permitiu comparar cenários climáticos distintos em Sergipe.

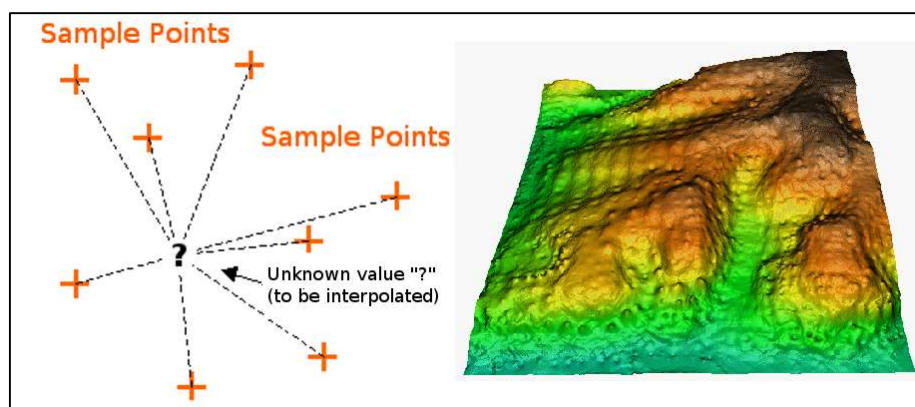
Os mapas foram confeccionados, majoritariamente, com auxílio do QGIS, com os seguintes temas:

- a) Isolinhas do Índice de Aridez;
- b) Isolinhas de Evapotranspiração MLT anual e MLT dos trimestres mais úmidos e secos;
- c) Isolinhas de Precipitação MLT anual, MLT dos trimestres mais úmidos e secos.

Os mapas citados nos itens a, b e c foram elaborados para 2 (dois) intervalos: 1961 a 1990 e 1991 a 2020.

Nesta etapa a resolução espacial dos dados de precipitação, evapotranspiração e índice de aridez, originalmente com $0,1^\circ \times 0,1^\circ$, foi alterada para $0,01^\circ \times 0,01^\circ$, pelo simples fato que o tamanho do pixel original é grande em face a área territorial do estado de Sergipe. Para isso, fez-se a interpolação dos dados anteriormente mencionados. O método de interpolação dos dados climáticos para elaboração das isolinhas utilizado foi o IDW (*Inverse Distance Weighting* ou Ponderação pelo Inverso da Distância). Este consiste em um método determinístico em que se pode obter o valor em um ponto sem informação com base na média ponderada da distância dos valores da variável em questão com base em pontos que contém informações conhecidas (PELLICONE et al. 2018) (Ver Figura 14).

Figura 14. Método IDW.



Fonte: Mitas e Mitasova (1999, apud QGIS, 2014).

3.1.8 Aplicativo *Mobile*

Por fim, foi desenvolvido um aplicativo livre (*app*), com interface gráfica e amigável que compila alguns dos principais produtos desse trabalho. As funcionalidades do aplicativo são:

- Visualizar gráficos;
- Obter informações de precipitação, evapotranspiração e índice de aridez (IA) para as escalas de tempo anual, trimestre mais úmido (TMU) e trimestre mais seco (TMS).

Este *app* foi desenvolvido com auxílio do *React Native*, biblioteca que utiliza *JavaScript*, criada e mantida pelo *Facebook* para desenvolvimento de aplicativos móveis multiplataforma (iOS e Android) de forma nativa. Ou seja, todo o código desenvolvido é convertido para linguagem nativa do sistema, necessitando assim da criação de apenas um código. Somado a isso, podem-se destacar outras características, tais como: *fast refresh*, ou seja, *feedback* quase instantâneo das alterações além de possuir inúmeras bibliotecas. Por estes fatos, o *React Native* vem crescendo e sendo adotado inclusive por diversas empresas como a: *Uber*, *Instagram* e o próprio *Facebook* (NETO e GARCIA, 2018).

Antes iniciar a etapa de codificação, realizou-se a prototipagem e criação da interface do usuário (*User Interface* ou *UI*) da aplicação, de modo a viabilizar o aplicativo desenvolvido e permitir a navegação intuitiva pelo usuário, respectivamente. Para esta etapa, foi utilizada a ferramenta *Figma*. Finalizada esta etapa e comprovada a viabilidade do aplicativo, o desenvolvimento prosseguiu com as etapas de codificação ou programação, testes e por fim distribuição do aplicativo na *Google Play Store*, ou seja, atualmente o aplicativo apresenta compatibilidade, apenas, com dispositivos Android.

Para construção desta aplicação recorreu-se a recursos como o *Firebase* e o *Google Maps*, ambos da *Google*. O primeiro funciona como um *backend*, ou seja, algo que o usuário não interage, que tem por finalidade gerenciar banco de dados, armazenar dados na nuvem, entre outras. Já o segundo recurso refere-se a um mapa amplamente conhecido que permite visualizar localidades, inserir marcadores, facilitando assim a interação do usuário com a aplicação.

Por fim, ressalta-se que todo o estudo aqui descrito, inclusive com o desenvolvimento do aplicativo, foi submetido como proposta de pesquisa junto à Fundação de Apoio à Pesquisa e à Inovação Tecnológica do Estado de Sergipe (FAPITEC), segundo o edital FAPITEC/SE/FUNTEC N° 04/2021 – Mestrado e Doutorado com Produto Tecnológico. A proposta foi aprovada em primeiro lugar e foi executada com apoio financeiro da FAPITEC.

3.2 DEFINIÇÃO DE CRITÉRIO ALTERNATIVO PARA DELIMITAÇÃO DO SEMIÁRIDO SERGIPANO

3.2.1 Aquisição dos dados de P e ETo

Os dados utilizados aqui foram provenientes da base BR-DWGD, já caracterizada ao longo deste trabalho e a forma de aquisição foi similar àquela descrita no item 3.1.2.

3.2.2 Balanço entre P e ETo

Dado que o trabalho tem por objetivo propor uma alternativa simplificadora ao critério de déficit hídrico utilizado pela SUDENE, propõe-se aqui um balanço, para cada ponto da grade BR-DWGD, entre P e ETo como mostrado na Equação 13.

$$BH = P - ETo \quad (13)$$

em que: BH é o balanço resultante em mm, P é a precipitação em mm e ETo é a evapotranspiração em mm.

A formulação utilizou, nessa etapa, o passo de tempo diário e mensal. Na etapa de calibração selecionou-se para o critério proposto aquele que melhor se adequasse à delimitação da região semiárida.

3.2.3 Percentual do balanço negativo entre P e ETo

A região semiárida caracteriza-se por balanços hídricos negativos (CARDOSO et al., 2023). Logo, o critério a ser proposto deve respeitar tal premissa.

Nesse contexto, e de posse dos dados de P e ETo, buscou-se contabilizar o número de vezes em que o balanço da Equação 13 foi negativo (N_{BHneg}) para cada ponto da grade BR-DWGD. Os resultados obtidos foram representados em termos percentuais, ou seja, dividiu-se os resultados pelo número total de observações no período escolhido (N), conforme mostrado na equação 14.

$$\%Neg = \frac{N_{BHneg}}{N} \quad (14)$$

O procedimento foi testado para dois passos de tempo: diário e mensal. O passo de tempo escolhido para ser utilizado pelo critério de delimitação proposto foi àquele que apresentou melhores resultados na etapa de calibração.

Com os resultados da equação 14 para cada um dos pontos da base BR-DWGD, buscou-se espacializar os mesmos com auxílio de uma ferramenta SIG. Essa espacialização teve como objetivos facilitar a manipulação dos dados, bem como permitir a visualização deles na área de estudo. Nesta etapa, fez-se uso da ferramenta QGIS.

3.2.4 Calibração e obtenção do percentual a ser adotado pelo critério

Com os resultados espacializados provenientes da etapa anterior, buscou-se definir um percentual de valores negativos (%Neg) e o passo de tempo (diário ou mensal) que melhor representasse a região semiárida para o estado de Sergipe. Na prática, fez-se um filtro para diversos percentuais no produto espacial obtido na etapa 3.2.3, com auxílio da ferramenta de filtro do QGIS.

A calibração consiste no ajuste de um modelo na tentativa de capturar as dinâmicas de um determinado sistema (MULETA e NICKLOW, 2005; GUPTA et al., 2014; ARNOLD et al., 2015, apud FUJITA, 2018). Nesse sentido, tomou-se como referência para a calibração a última delimitação oficial consolidada pela SUDENE, publicada em 2017. Esta delimitação fez uso de dados para os anos de 1981 a 2010, logo a calibração foi realizada para esse período.

3.2.5 Formalização do critério e delimitação do Semiárido Sergipano

Definidos os parâmetros do critério proposto neste trabalho, fez-se a formalização do mesmo e a consequente delimitação da região semiárida. Para essa delimitação foram utilizados dados de 1991 a 2019. Este período converge, quase totalmente, com o intervalo de tempo utilizado na atualização que vem sendo desenvolvida pela SUDENE para a delimitação dessa região. O relatório preliminar publicado por esse órgão, em 2021, descreve que o período utilizado na atualização foi de 1991 a 2020. A diferença no intervalo de tempo aqui adotado deve-se ao fato de que a base BR-DWGD que foi utilizada tem o fim dos registros em 31/07/2020.

Cabe ressaltar que os demais critérios complementares para delimitação da região semiárida, trazidos nas alíneas “a” e “b” da resolução Nº150/2021, não tiveram nenhuma modificação e foram utilizados da mesma forma que foram propostos.

3.2.6 Comparação entre delimitações do Semiárido

Por fim, realizaram-se comparações entre as delimitações da SUDENE de 2017 e 2021 (preliminar) e a delimitação do semiárido pelo critério proposto por este trabalho.

De modo a verificar a coerência da delimitação pelo critério proposto, fez-se também consulta aos registros de seca e estiagem da Superintendência Estadual e Defesa Civil (SUPDEC) de Sergipe de modo a comparar esses dois produtos. Isso torna-se importante visto que a região semiárida possui predisposição aos fenômenos de seca e estiagem (TAVARES et al, 2019; SUDENE, 2021).

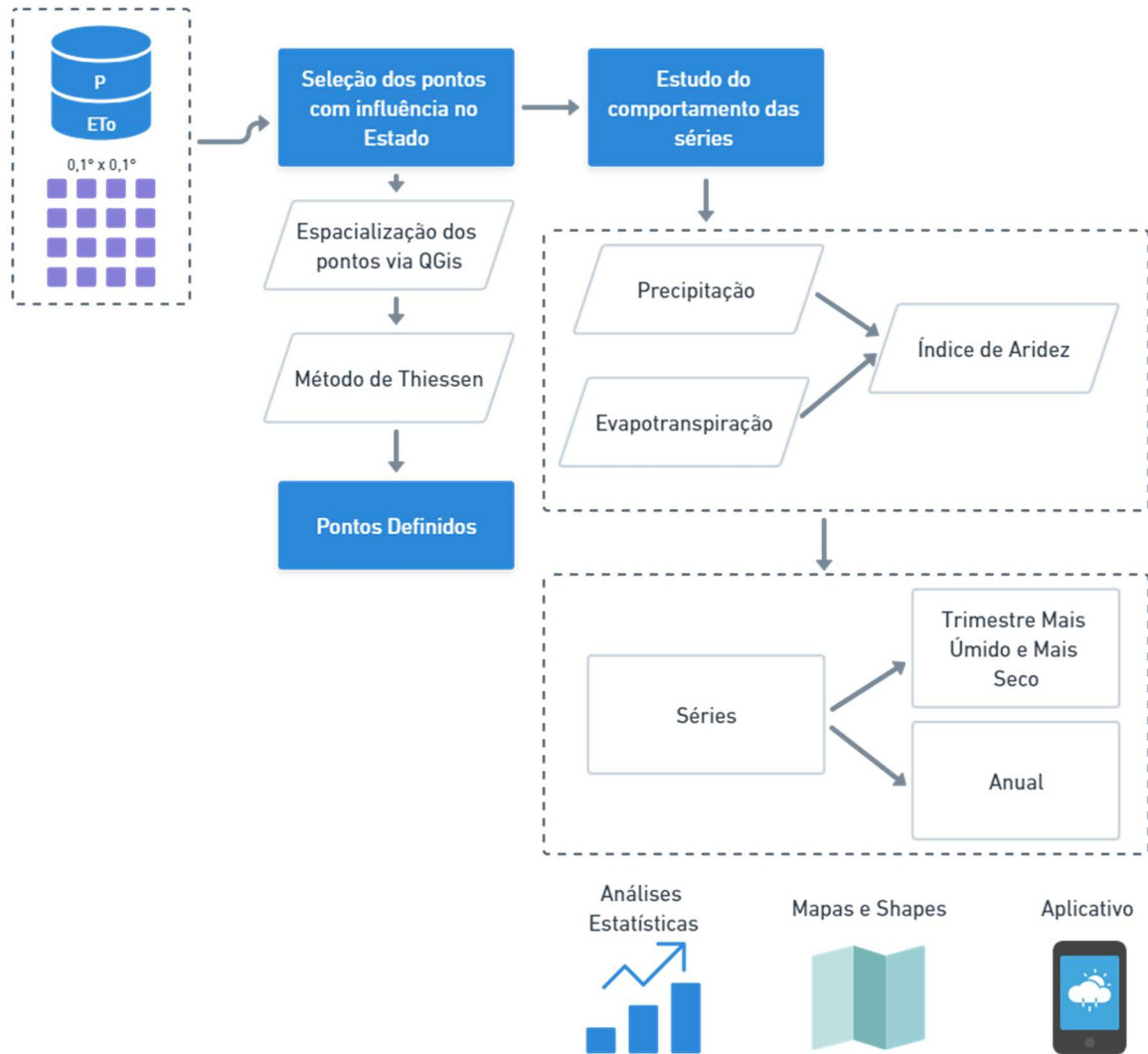
Os registros coletados da SUPDEC foram referentes aos anos de 2013 a 2020. Tais registros foram organizados e os municípios sergipanos em que houve alguma situação de emergência ou estado de calamidade pública por eventos de seca e estiagem foram destacados em um mapa de modo a facilitar a sua visualização espacial e a posterior comparação.

Os fluxogramas relativos aos procedimentos metodológicos adotados neste trabalho foram ilustrados nas Figuras 15, 16 e 17.

3.3 FLUXOGRAMAS DO ESTUDO

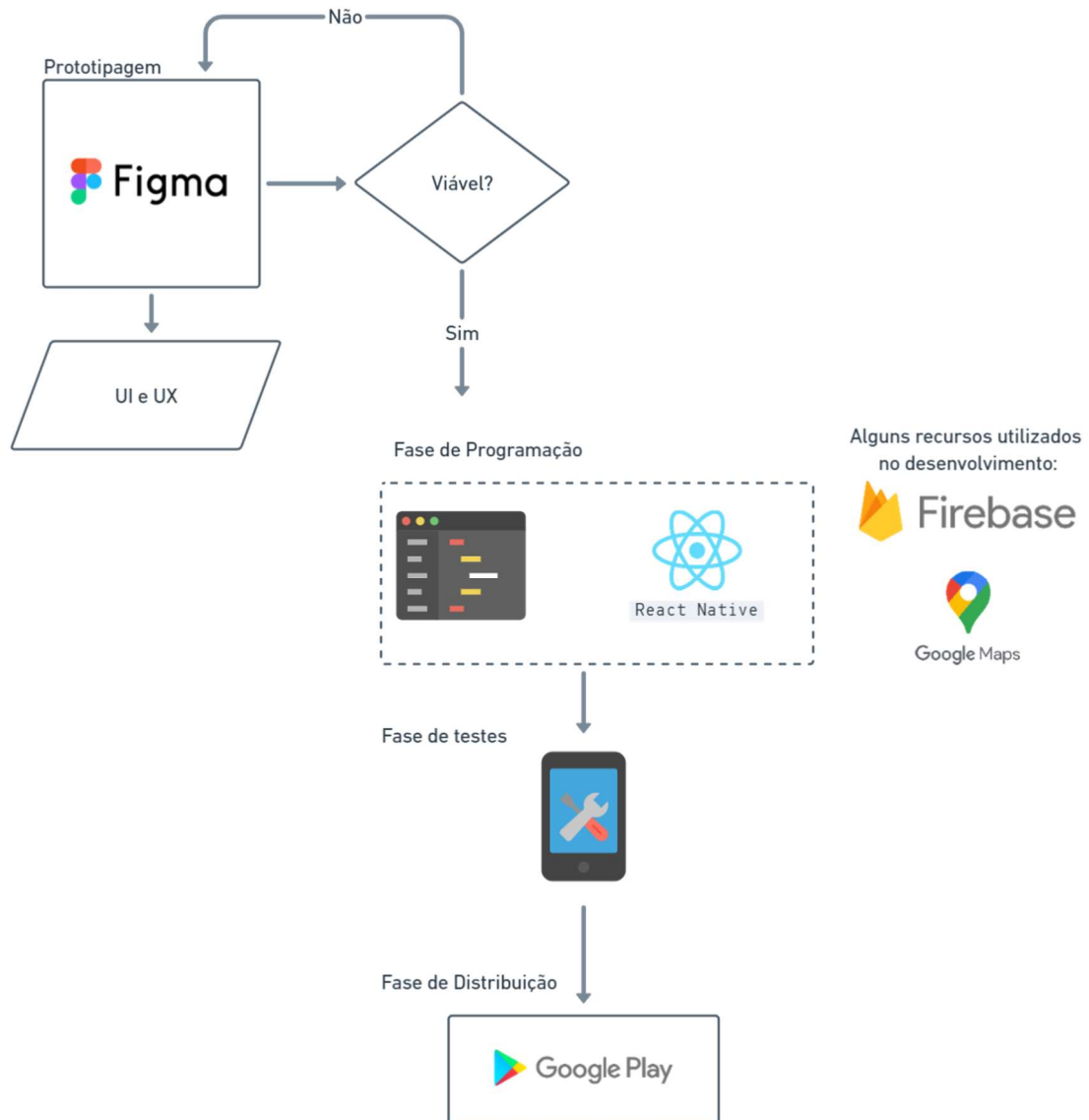
Figura 15. Fluxo metodológico adotado para avaliação das variáveis climatológicas.

Base de Xavier et al. (2022)



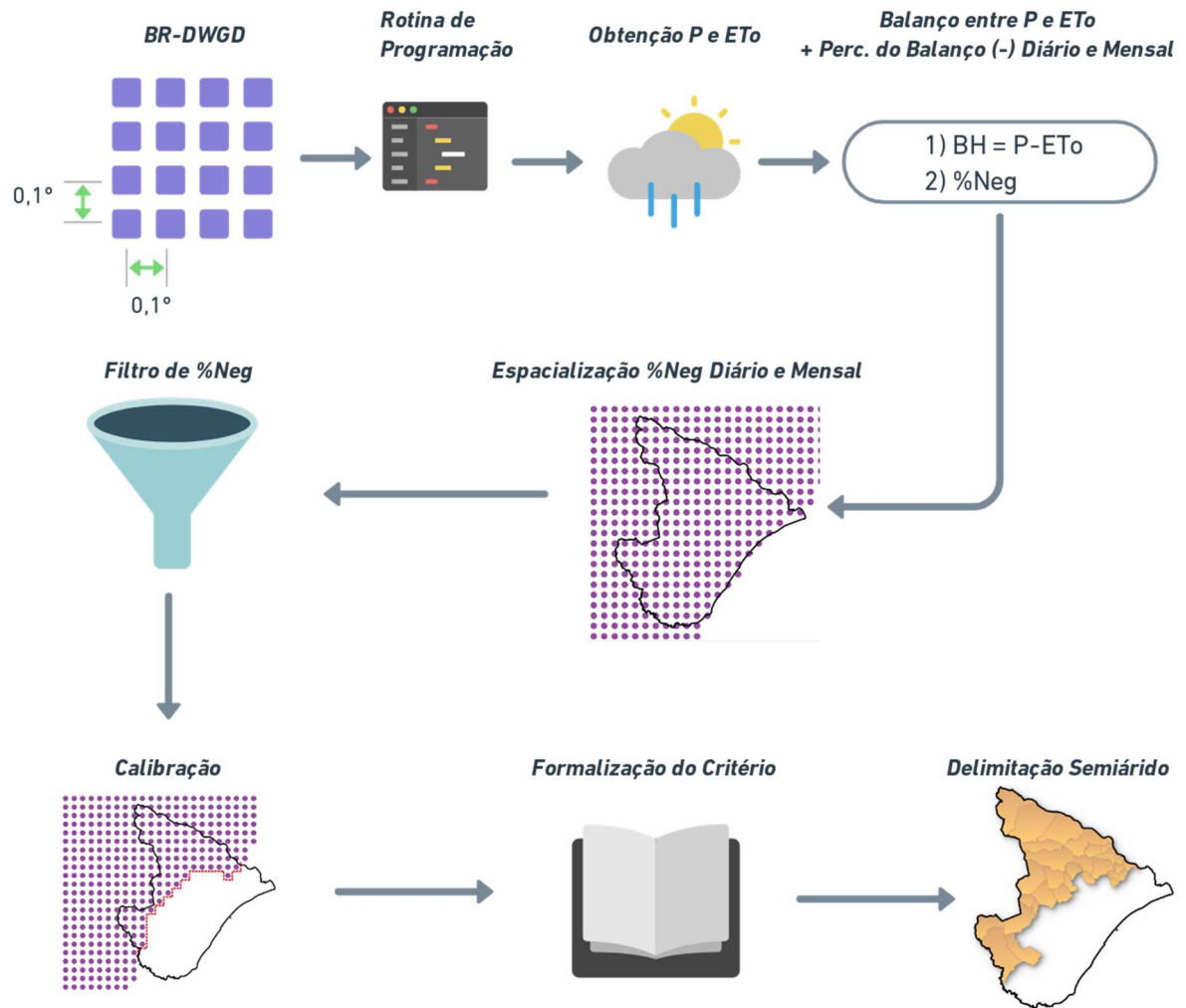
Fonte: Produzido nesta pesquisa (2023).

Figura 16. Fluxo para confecção do aplicativo.



Fonte: Produzido nesta pesquisa (2023).

Figura 17. Fluxo para definição de critério alternativo para delimitação da região semiárida sergipana.



Fonte: Produzido nesta pesquisa (2023).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 INVESTIGAÇÃO DAS VARIÁVEIS CLIMATOLÓGICAS

4.1.1 Pré-Processamento dos Dados

Como dito e mostrado na metodologia fez-se a seleção de 218 pontos com alguma influência no estado de Sergipe (item 3.1.1), adquiriram-se os dados de P e ETo (item 3.1.2) e na sequência geraram-se 16 séries (8 de P e 8 ETo), em escala diária, para cada bacia hidrográfica (item 3.1.3). Tais dados foram agrupados em termos de total anual, trimestre mais úmido (TMU) e trimestre mais seco (TMS). O agrupamento foi feito considerando o ano hidrológico. A definição do TMU e TMS foram escolhidos como os três meses com maior e menor Média de Longo Termo (MLT), respectivamente.

No que se refere ao ano hidrológico, pode-se perceber pelos gráficos da Figura 18 que o início deste, para todas as 8 bacias hidrográficas de Sergipe, é dado em abril e finda em março do ano subsequente, visto que abril é o primeiro mês em que, geralmente, a média mensal da precipitação supera a precipitação MLT.

Os TMU e TMS também foram definidos avaliando a Figura 18.

Para todas as bacias hidrográficas analisadas o TMU foi o de Maio-Junho-Julho (MJJ). Kousky (1979 apud DA SILVA et al., 2012) também cita que esse trimestre é o mais chuvoso em Sergipe.

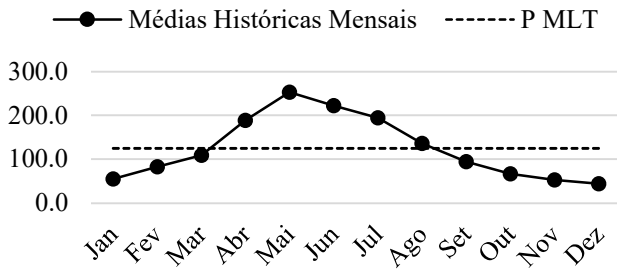
No entanto, o TMS não foi único para todas as bacias. Em 6 bacias (Abaís, Japaratuba, Piauí, Sapucaia, Sergipe e Vaza-Barris) o TMS foi registrado em Novembro-Dezembro-Janeiro (NDJ) e em 2 bacias (Real e São Francisco) o TMS foi dado em Outubro-Novembro-Dezembro (OND).

Como forma de facilitar as análises estatísticas, o presente trabalho fez a consideração que o TMS foi aquele referente aos meses de NDJ, uma vez que a maior parte das bacias tiveram os menores índices históricos pluviométricos nesse trimestre.

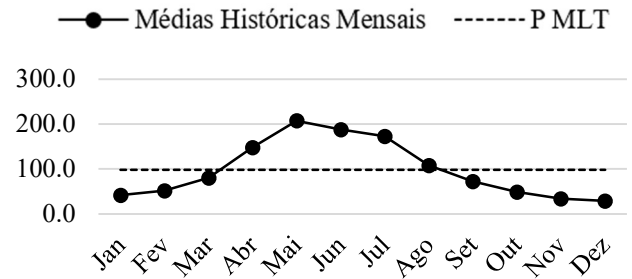
Dessa forma, de posse de todas as informações compiladas nesse tópico pôde-se realizar as análises estatísticas.

Figura 18. Precipitações médias históricas mensais e de longo termo das bacias hidrográficas do estado de Sergipe.

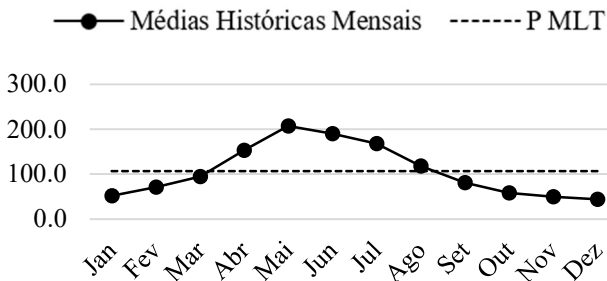
Bacia Hidrográfica do Abaís



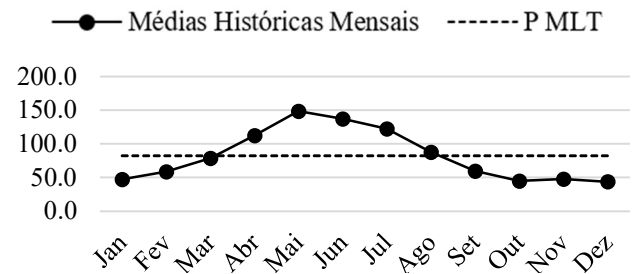
Bacia Hidrográfica do Rio Japarutuba



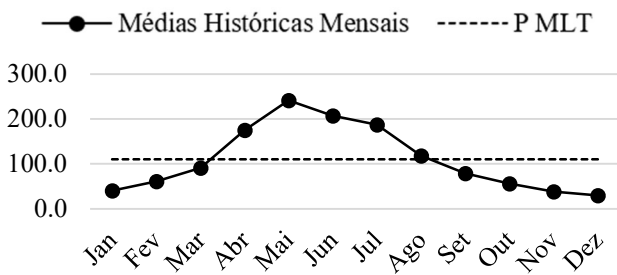
Bacia Hidrográfica do Rio Piauí



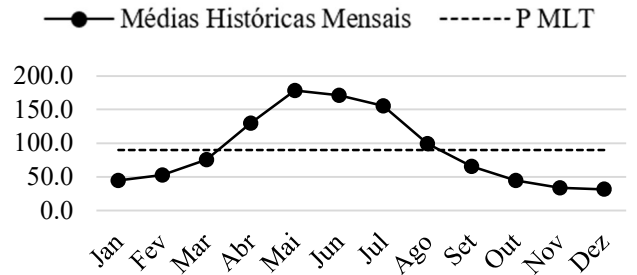
Bacia Hidrográfica do Rio Real



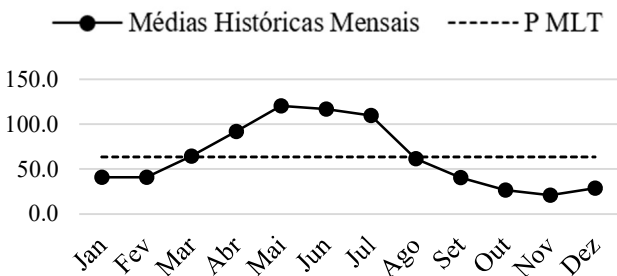
Bacia Hidrográfica do Sapucaia



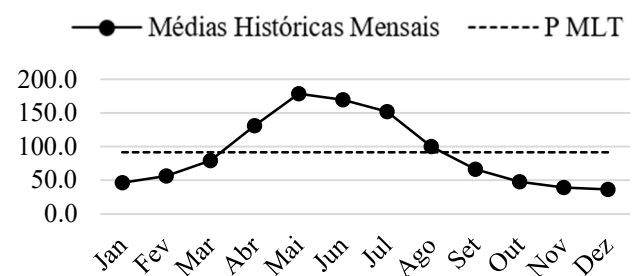
Bacia Hidrográfica do Rio Sergipe



Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco



Bacia Hidrográfica do Rio Vaza Barris



Fonte: Produzido nesta pesquisa (2023).

4.1.2 Análises Estatísticas

As análises estatísticas serão apresentadas segundo o agrupamento dos dados: a) anual, b) TMU e c) TMS.

a) Análise Estatística Anual

Antes de apresentar os resultados dos testes estatísticos serão trazidos na Tabela 2 algumas estatísticas básicas das séries de P, ETo e IA anuais para as bacias de estudo ao longo dos anos de 1961 a 2019.

Tabela 2. Estatísticas básicas das variáveis P, ETo e IA anual.

Bacia	Variável	MLT_{ANUAL} (mm)	Desv. Padrão (mm)
São Francisco	P	763,2	221,0
	ETo	1668,0	86,1
	IA	0,46	0,15
Japarutuba	P	1178,7	326,3
	ETo	1584,1	78,8
	IA	0,74	0,23
Sapucaia	P	1323,9	379,0
	ETo	1575,7	76,0
	IA	0,84	0,27
Sergipe	P	1082,6	284,0
	ETo	1586,7	82,9
	IA	0,68	0,21
Vaza Barris	P	1102,9	288,0
	ETo	1577,3	81,7
	IA	0,70	0,21
Caueira/Abais	P	1499,3	374,1
	ETo	1550,8	80,3
	IA	0,97	0,27
Piauí	P	1285,5	318,8
	ETo	1543,6	83,1
	IA	0,83	0,24
Real	P	988,1	247,0
	ETo	1537,6	88,1
	IA	0,64	0,19
Mínimo	P	763,2 (São Francisco)	221,0
	ETo	1537,6(Real)	76,0
	IA	0,46(São Francisco)	0,15
Máximo	P	1499,3(Caueira/Abais)	379,0
	ETo	1668,0(São Francisco)	88,1
	IA	0,97(Caueira/Abais)	0,27

Fonte: Produzido nesta pesquisa (2023).

Observou-se a partir da Tabela 2 que a bacia do São Francisco, em média, apresenta suscetibilidade a desertificação alta ($0,21 < IA < 0,5$) e clima semiárido ($0,21 < IA < 0,5$), fato explicado pelo baixo índice pluviométrico e alto índice evaporimétrico. Esses resultados corroboram com outros estudos realizados na região. Gois et al. (2016), fazendo estudos na região de Poço Redondo, no São Francisco, destacou a suscetibilidade à desertificação nessa região. Gois et al. (2022), mapeando risco à desertificação na região de Canindé do São Francisco, também no São Francisco, detectou riscos elevados à desertificação na região.

Em todas as bacias, a P_{MLT} anual foi inferior à ET_{oMLT} anual, característico de regiões onde há déficit hídrico.

A Tabela 2 também traz informações quanto ao desvio padrão. Pode-se perceber também que os desvios padrões das P_{MLT} anual são maiores que os desvios dos valores anuais da ET_{oMLT} anual em todas as bacias do estudo. Isso indica que a chuva tem maior variabilidade em torno de sua média do que a evapotranspiração. Essa constatação é consistente com o relatado por Collischonn e Tucci (2014), que apontam que a evapotranspiração possui menor variabilidade em comparação com a precipitação. Os mesmos autores, inclusive, afirmam que essa baixa variabilidade da evapotranspiração é um dos fatores que fazem com que se adotem valores médios de longo prazo em estudos hidrológicos.

A Tabela 3 compila os valores-p dos testes estatísticos utilizados nessa pesquisa para as variáveis de P , ET_{o} e IA por bacia hidrográfica ao longo dos anos de 1961 a 2019 e nível de significância α de 5%.

Tabela 3. Valor-p dos testes estatísticos das séries anuais de P, ETo e IA (1961-2019), com indicação da tendência de crescimento (▲) ou decréscimo (▼) e do ano de mudança para $\alpha = 5\%$.

Bacia	Variável	Spearman	Mann-Kendall	Pettitt
São Francisco	P	0,217	0,219	0,449
	ETo ▲	0,002	▲	0,004
	IA	0,102	0,108	0,231
Japarutuba	P	0,228	0,229	0,342
	ETo ▲	0,006	▲	0,010
	IA	0,117	0,114	0,304
Sapucaia	P	0,083	0,087	0,110
	ETo	0,050	0,087	0,069
	IA	0,055	0,060	0,106
Sergipe	P	0,716	0,579	1,000
	ETo ▲	0,001	▲	0,008
	IA	0,468	0,883	1,000
Vaza Barris	P	0,868	0,969	1,000
	ETo ▲	0,035	▲	0,038
	IA	0,692	0,754	1,000
Caueira/Abais	P	0,398	0,440	0,185
	ETo	0,066	0,089	0,064
	IA	0,276	0,308	0,118
Piauí	P	0,942	0,745	0,785
	ETo	0,084	0,264	0,135
	IA	0,680	0,934	1,000
Real	P	0,600	0,628	0,924
	ETo ▲	0,032	▲	0,047
	IA	0,444	0,433	0,577

Fonte: Produzido nesta pesquisa (2023).

Os resultados indicaram que não houve tendências estatisticamente significativas nas séries de chuva anual em nenhuma das bacias estudadas, segundo os testes de Spearman e Mann-Kendall.

Sobre esse assunto alguns estudos vêm apontando para uma redução da chuva ao longo dos anos no NEB, inclusive, com significância estatística. Exemplos desses estudos são aquelas que foram realizados por Carvalho et al. (2020), Cruz et al. (2017).

Penereiro et al. (2017) observaram em diversas estações do NEB que apenas uma apresentou tendência de queda na chuva, as demais não tiveram algum tipo de tendência.

Apesar dos resultados distintos apresentados pelos estudos acima, Marengo et al. (2011) explicam em seu trabalho que não há consenso sobre a redução na chuva. Eles afirmam que o que de fato existe são variações decadais que estão possivelmente associadas à Oscilação Decadal do Pacífico (ODP). Os autores ainda citam que tendências nas chuvas irão depender do período analisado. Cruz et al. (2017), por exemplo, utilizaram estações com 30 anos de dados, Carvalho et al. (2020), apesar de utilizarem 57 anos de dados, avaliaram apenas uma estação no estado de Sergipe. Já Penereiro et al. (2017) utilizaram os dados disponíveis em cada posto de medição. Esses fatos evidenciam a diferença dos períodos utilizados pelos autores, o que possivelmente fez com que os resultados obtidos fossem diferentes, indo ao encontro ao que foi observado por Marengo et al. (2011).

Dessa forma, o panorama trazido por esse estudo para o Estado de Sergipe destoa do panorama apresentado pelos estudos que apontam para uma redução da chuva e se aproxima dos estudos que apontam para ausência de tendência nas séries das chuvas anuais.

Acerca da evapotranspiração, os resultados mostrados na Tabela 3 apontaram tendência de crescimento em 5 das 8 bacias: São Francisco, Japarutuba, Sergipe, Vaza-Barris e Real. Dentre as 3 bacias que não apresentaram tendência para a evapotranspiração, 2 são bacias litorâneas (Sapucaia e Abaís). Estudos apontam que tendências de crescimento na evapotranspiração podem estar associadas ao aumento da temperatura e intensificação do processo de desertificação (ROCHA JÚNIOR et al., 2020).

Os pontos de quebra apontado pelo teste de Pettitt foram dados nos anos de 1979 (São Francisco) e 1992 (Sergipe e Real). Este último, inclusive, ficou próximo do período de mudança detectado por Cabral Júnior et al. (2020), utilizando também o teste de Pettitt em uma outra região do NEB, o qual apontou uma quebra no ano de 1996.

Quanto ao IA, em nenhuma bacia foi encontrada tendência com significância estatística. Apesar da tendência crescente da evapotranspiração em algumas bacias, esse fato não impactou o IA. Isso pode ser explicado pelo fato do IA depender também da chuva, que não apresentou viés. Cabral Júnior e Bezerra (2018) afirmam que a variável dominante no IA é a precipitação, justificando a ausência de tendência no IA devido ao impacto da ausência de tendência da chuva.

Por fim, destaca-se que os testes de Spearman e Mann-Kendall convergiram ao apontar o comportamento estacionário ou não estacionário para todas as bacias, evidenciando assim o potencial de ambos os testes na avaliação do viés temporal.

Os gráficos de P, ETo e IA encontram-se no Apêndice A, B e C, respectivamente.

b) Análise Estatística do TMU

Antes de apresentar os resultados dos testes estatísticos serão trazidos na Tabela 4 algumas estatísticas básicas das séries de P e ETo para o TMU para as bacias de estudo ao longo dos anos de 1961 a 2019. Como mostrado no item 4.1.1, o TMU é trimestre MJJ.

Tabela 4. Estatísticas básicas das variáveis P e ETo para o TMU.

Bacia	Variável	MLT _{TMU} (mm)	Desv. Padrão (mm)	MLT _{TMU} /MLT _{ANUAL}
São Francisco	P	346,9	125,9	45,5%
	ETo	291,5	22,9	17,5%
Japaratuba	P	567,9	185,7	48,2%
	ETo	284,9	18,9	18,0%
Sapucaia	P	635,6	211,1	48,0%
	ETo	286,7	18,1	18,2%
Sergipe	P	504,9	147,0	46,6%
	ETo	285,4	19,5	18,0%
Vaza Barris	P	499,9	140,0	45,3%
	ETo	284,4	19,2	18,0%
Caueira/Abais	P	669,5	180,6	44,7%
	ETo	284,8	18,0	18,4%
Piauí	P	564,7	152,4	43,9%
	ETo	279,5	18,5	18,1%
Real	P	408,1	116,9	41,3%
	ETo	276,2	20,0	18,0%
Mínimo	P	346,9 (São Francisco)	116,9	41,3%
	ETo	276,2 (Real)	18,0	17,5%
Máximo	P	669,5 (Caueira/Abais)	211,1	48,2%
	ETo	291,5 (São Francisco)	22,9	18,4%

Fonte: Produzido nesta pesquisa (2023).

Assim como verificado na análise anual, a bacia do São Francisco foi aquela que apresentou os menores índices de precipitação e maiores índices de evapotranspiração.

Como era esperado, ao analisar o TMU foram observadas altas MLT's de precipitação quando comparadas às MLT's de evapotranspiração. Tempos chuvosos apresentam umidade relativa do ar mais alta e conseqüentemente menor evapotranspiração. Além disso, dias chuvosos apresentam maiores quantidades de nuvens fazendo com que a radiação que atinge a superfície terrestre seja menor. Esta última, inclusive, é a principal variável explicativa da evapotranspiração (COLLISCHONN E TUCCI, 2014).

A partir da última coluna da Tabela 4 percebe-se que, em média, grande parte das chuvas (41,3 % - 48,2%) se concentram em 3 meses (MJJ) do ano, diferentemente do que ocorre com a ETo. Silva e Aquino (2017) apontam que essa concentração de chuva em um curto intervalo de tempo é uma das características do NEB.

A partir dessas informações, projetando-se um cenário hipotético e plausível em que 45% da chuva se concentra em 3 meses, e supondo que o restante da chuva se distribua de forma regular ao longo dos demais meses (o que não acontece), aproximadamente 6% da chuva se distribuiria nos demais meses. Sendo assim, deduz-se o desafio para os gestores dos recursos hídricos para tomar as melhores decisões quanto a esse fato que tem impacto direto na disponibilidade de água e que está concentrado em poucos meses do ano.

A Tabela 5 compila os valores-p dos testes estatísticos utilizados nessa pesquisa para as variáveis de P e ETo por bacia hidrográfica para o TMU ao longo dos anos de 1961 a 2019 e nível de significância (α) de 5%.

Tabela 5. Valor-p dos testes estatísticos das séries do TMU de P, ETo e IA (1961-2019), com indicação da tendência de crescimento (\blacktriangle) ou decréscimo (\blacktriangledown) e do ano de mudança para $\alpha = 5\%$.

Bacia	Variável	Spearman	Mann-Kendall	Pettitt
São Francisco	P	0,483	0,530	0,415
	ETo	0,514	0,513	0,805
Japarutuba	P	0,486	0,522	0,352
	ETo	0,301	0,266	0,511
Sapucaia	P	0,232	0,219	0,161
	ETo	0,464	0,410	0,619
Sergipe	P	0,921	0,917	1,000
	ETo	0,349	0,289	0,605
Vaza Barris	P	0,690	0,666	0,634
	ETo	0,844	0,784	1,000
Caueira/Abais	P	0,604	0,619	0,725
	ETo	0,819	0,845	1,000
Piauí	P	0,806	0,734	1,000
	ETo	0,975	0,958	1,000
Real	P	0,935	0,948	1,000
	ETo	0,883	0,938	1,000

Fonte: Produzido nesta pesquisa (2023).

O TMU seguiu o comportamento da chuva anual e não apresentou tendência de crescimento ou decréscimo segundos os testes de estacionariedade para nenhuma bacia do estado de Sergipe, uma vez que os valores-p foram superiores a 0,05. Essa similaridade do

comportamento estacionário entre as séries anuais e do trimestre mais úmido pode ser explicada pela grande representatividade desse trimestre nas chuvas anuais como discutido anteriormente. Os gráficos de chuva para o TMU encontram-se no Apêndice D.

No que se refere a ETo do TMU esta não apresentou viés significativo ao longo do tempo em nenhuma bacia do estado de Sergipe. Diferentemente da precipitação do TMU que seguiu o padrão estatístico da série de chuva anual, a ETo do TMU não seguiu o padrão da ETo anual, a qual teve comportamento crescente em 5 das 8 bacias sergipanas. Isto posto, infere-se que a ETo do TMU não tem grande contribuição no comportamento não estacionário das bacias que apresentaram tal comportamento. Outro ponto que contribui para essa argumentação é o fato de a ETo MLT_{TMU} ter pouca representatividade em relação a ETo anual (17,5% a 18,4%, Tabela 4). Os gráficos de evapotranspiração para o TMU encontram-se no Apêndice E.

c) Análise Estatística do TMS

Antes de apresentar os resultados dos testes estatísticos serão trazidos na Tabela 6 algumas estatísticas básicas das séries de P e ETo para o TMS para as bacias de estudo ao longo dos anos de 1961 a 2019. Como mostrado no item 4.1.1, o TMS adotado para essa pesquisa foi o trimestre NDJ.

Tabela 6. Estatísticas básicas das variáveis P e ETo para o TMS.

Bacia	Variável	MLT_{TMS} (mm)	Desv. Padrão (mm)	MLT_{TMS}/MLT_{ANUAL}
São Francisco	P	90,6	69,6	11,9%
	ETo	524,7	34,0	31,5%
Japarutuba	P	103,5	83,3	8,8%
	ETo	492,9	31,2	31,1%
Sapucaia	P	108,3	80,1	8,2%
	ETo	487,3	30,6	30,9%
Sergipe	P	110,3	82,1	10,2%
	ETo	492,3	32,2	31,0%
Vaza Barris	P	122,1	83,9	11,1%
	ETo	489,1	31,8	31,0%
Caueira/Abais	P	152,3	89,2	10,2%
	ETo	476,1	32,0	30,7%
Piauí	P	145,6	87,8	11,3%
	ETo	478,1	32,5	31,0%
Real	P	138,4	84,9	14,0%
	ETo	477,2	33,9	31,0%
Mínimo	P	90,6 (São Francisco)	69,6	8,2%
	ETo	476,1 (Caueira/Abais)	30,6	30,7%
Máximo	P	152,3 (Caueira/Abais)	89,2	14,0%
	ETo	524,7 (São Francisco)	34,0	31,5%

Fonte: Produzido nesta pesquisa (2023).

Assim como nas análises anteriores, a bacia do São Francisco foi aquela que apresentou as condições mais críticas em relação a MLT_{TMS}. Sendo assim, ao avaliar todas os agrupamentos temporais percebem-se que essa bacia apresentou menores P MLT anual, P MLT_{TMU} e P MLT_{TMS}, e maiores ETo anual, ETo MLT_{TMU} e ETo MLT_{TMS}.

Analogamente ao observado no TMU, esperava-se que o TMS apresentasse altos valores de MLT's de evapotranspiração quando comparados aos valores das MLT's de precipitação. Como elucidado no tópico anterior, tempos menos chuvosos tendem a apresentar

menos nuvens, por conseguinte haverá mais radiação solar atingindo a superfície terrestre fazendo com que os valores de evapotranspiração sejam maiores.

A partir da Tabela 6 também se percebe que a precipitação MLT_{TMS} , em média, apresenta pouca expressão em todas as bacias (8,2% a 14%), diferentemente da $ETo_{MLT_{TMS}}$ que, em média, tem valor expressivo (30,7% a 31,5%). Atentando-se a $ETo_{MLT_{TMS}}$, dado que é a mais representativa no TMS em relação aos valores de MLT anuais, outros estudos em regiões distintas do NEB apresentaram percentuais similares de ETo no TMS quando comparados aos resultados obtidos nesta pesquisa. Silva et al. (2013), por exemplo, estudando a evapotranspiração potencial no Rio Grande do Norte percebeu que ela se concentrava com percentual próximo a 30% no TMS da região.

A Tabela 7 compila os valores-p dos testes estatísticos utilizados nessa pesquisa para as variáveis de P e ETo por bacia hidrográfica para o TMS ao longo dos anos de 1961 a 2019 (59 anos) e nível de significância (α) de 5%.

Tabela 7. Valor-p dos testes estatísticos das séries do TMS de P, ETo e IA (1961-2019), com indicação da tendência de crescimento (\blacktriangle) ou decréscimo (\blacktriangledown) e do ano de mudança para $\alpha = 5\%$.

Bacia	Variável	Spearman	Mann-Kendall	Pettitt
São Francisco	P	0,127	0,136	0,332
	ETo \blacktriangle	0,006 \blacktriangle	0,009	0,064
Japaratuba	P	0,092	0,112	0,110
	ETo \blacktriangle	0,046	0,082	0,231
Sapucaia	P	0,174	0,170	0,254
	ETo	0,259	0,340	0,382
Sergipe	P	0,150	0,187	0,287
	ETo \blacktriangle	0,004 \blacktriangle	0,012	0,036 (2001)
Vaza Barris	P	0,171	0,229	0,332
	ETo \blacktriangle	0,018 \blacktriangle	0,038	0,055
Caueira/Abais	P	0,101	0,129	0,118
	ETo	0,108	0,170	0,131
Piauí	P	0,188	0,278	0,254
	ETo	0,089	0,126	0,081
Real	P	0,473	0,628	0,461
	ETo \blacktriangle	0,017 \blacktriangle	0,031	0,011 (1992)

Fonte: Produzido nesta pesquisa (2023).

A chuva do TMS seguiu o comportamento da chuva anual e não apresentou tendência de crescimento ou decréscimo segundo os testes de estacionariedade para nenhuma bacia

do Estado, uma vez que os valores-p foram superiores a 0,05. Os gráficos de chuva para o TMS encontram-se no Apêndice F.

Quanto a ETo do TMS, esta apresentou viés de crescimento em 5 das 8 bacias do estado de Sergipe, foram estas: São Francisco, Japarutuba, Sergipe, Vaza Barris e Real. Nestas mesmas bacias foram verificadas tendências de crescimento da ETo anual. Dessa forma, pode-se inferir que, no mínimo, a ETo do TMS para essas bacias tem influência significativa no comportamento crescente da ETo anual. De forma a contribuir com essa afirmação ressalta-se o comportamento estacionário da ETo no TMU.

Os pontos de quebra apontados pelo teste de Pettitt foram dados nos anos de 2001 (Sergipe) e 1992 (Real). As demais bacias (Sapucaia, Caueira/Abais e Piauí) não apresentaram viés com significância estatística. Os gráficos de chuva para o TMS encontram-se no Apêndice G.

Por fim, percebe-se que assim como aconteceu na avaliação das séries anuais os testes de estacionariedade (Spearman e Mann-Kendall) apresentaram resultados convergentes para o TMS, exceto para a bacia do Japarutuba. Alguns autores estudaram o poder desses dois testes a exemplo de Yue et al. (2002). Estes relatam que o poder dos testes depende do nível de significância adotado, magnitude da tendência, tamanho da amostra e quantidade de variação dentro de uma série temporal. Logo, uma dessas dependências pode justificar a não convergência dos resultados de estacionariedade no caso apresentado.

4.1.3 Investigação Espacial através de Mapas

De forma similar às análises estatísticas este item será segmentado segundo o agrupamento dos dados: a) MLT anual, b) MLT_{TMU} e c) MLT_{TMS}, sendo que tais análises foram realizadas para os períodos de 1961 a 1990 e 1991 a 2020.

a) Análise Espacial da MLT Anual

As análises espaciais da MLT anual da chuva, ETo e IA, para os 2 intervalos de tempo supramencionados, são ilustradas nas Figuras 19 a 21. Além da espacialização dessas variáveis, também foram construídas isolinhas e um gráfico de barras como forma de quantificar as áreas do estado de Sergipe dentro das faixas de valores da variável considerada.

No que se refere à precipitação MLT anual (Figura 19), percebe-se que uma das primeiras características é o efeito da continentalidade, onde os índices de precipitação decrescem no sentido do litoral para o interior. Tal característica foi evidenciada por Diniz et al. (2014), que reforçam que tal característica é uma das principais protagonistas para explicar a chuva em Sergipe, dado que o relevo no Estado é pouco movimentado. Autores como Amorim et al. (2020) também comentam a influência dos diversos sistemas meteorológicos (ZCIT, VCAN, DOL entre outras) que influenciam as dinâmicas da precipitação no NEB.

As isolinhas de chuva MLT anual do estado de Sergipe (Figura 19) variaram entre 600 mm a 1700 mm, no período compreendido entre 1961 a 1990, e 600 mm a 1400 mm, no período de 1991 a 2020. Essa primeira comparação permite perceber que houve uma redução de 300 mm nas isolinhas de maior valor. Em termos de área, a análise dos gráficos de barras permite concluir que as faixas com precipitações maiores que 1400 mm/ano foram as que tiveram reduções mais significativas de área no estado de Sergipe, sendo um total de 17% (20% em 1961 a 1990, contra 3% entre 1991 a 2020). Essa redução se deu principalmente no litoral. Pode-se notar também que essa redução de 17% observada na faixa chuva MLT anual de valores superiores a 1400 mm foi seguida de aumentos nas faixas de 1000 mm a 1200 mm e 1200 mm a 1400 mm, as quais juntas tiveram uma progressão de 16%.

Outro intervalo de valores importante a ser analisado são as faixas com chuvas inferiores a 800 mm/ano, dado que é um dos critérios adotados pela SUDENE para delimitação do semiárido nordestino. Nos anos de 1961 a 1990 o total da área de Sergipe nessa faixa de valores foi de 27%, já nos anos de 1991 a 2020 o total de área nesse intervalo de valores foi de 31%, representando assim um aumento de 4%. Esse aumento deveu-se principalmente ao avanço de

áreas com chuva médias anuais menores que 600 mm na porção noroeste do Estado (municípios Canindé de São Francisco e Poço Redondo, ambos situados na bacia Hidrográfica do Rio São Francisco). Gois et al. (2016) e Gois et al. (2022) ressaltam que esses dois municípios apresentam suscetibilidade à desertificação. Dado que a chuva é um dos principais protagonistas para essa avaliação, o baixo índice pluviométrico histórico nesses dois municípios, como visto, pode explicar o diagnóstico dado pelos autores.

Quanto à ETo MLT anual, suas isolinhas (Figura 20) variaram entre 1500 mm a 1750, no período compreendido entre 1961 a 1990, e no período compreendido entre 1991 a 2020, variaram entre 1550 mm a 1800 mm. Essa primeira comparação permite perceber que houve aumento da MLT anual da ETo (aumento de 50 mm nos limites inferior e superior). Em termos de área, nota-se através da análise dos gráficos de barras um aumento com uma maior magnitude na faixa entre 1550 mm a 1650 mm. Este correspondeu a uma crescente de 21% quando comparado os dois períodos aqui adotados. Esse aumento pode ser influência de alguma das variáveis explicativas da ETo como, por exemplo, a radiação solar. Esta última, inclusive, é a principal variável explicativa da evapotranspiração (COLLISCHONN E TUCCI, 2014). Nota-se também que esse avanço na área correspondente à faixa da ETo MLT anual entre 1550 mm a 1650 mm foi associado quase que diretamente a uma redução da área da faixa da ETo MLT com valores entre 1500 mm e 1550 mm, a qual teve uma redução de área de 25%.

Ao analisar as estatísticas básicas das variáveis P MLT e ETo MLT anuais (Tabela 2), a bacia do São Francisco foi aquela que apresentou os menores índices de precipitação e maiores índice de ETo. Ao analisar as Figuras 19 e 20, percebe-se que o norte do Estado apresenta os menores índices de precipitação e maiores índices de ETo indo ao encontro ao que já foi verificado.

A análise espacial da P e ETo MLT permite perceber que a variabilidade espacial da chuva é maior que a da ETo. Tucci (2005) confirma tal fato ao dizer que tanto a variabilidade espacial quanto temporal da evapotranspiração são pequenas quando comparadas a da precipitação.

Por fim, a Figura 21 ilustra o IA MLT anual, critério utilizado pela SUDENE na delimitação do semiárido ($IA \leq 0,5$). Nessa figura verificou-se que, nos 2 períodos utilizados, as regiões que se enquadram nessa faixa localizaram-se, principalmente, no noroeste e no sudoeste de Sergipe. Climaticamente notou-se a ausência de áreas áridas ($0,05 < IA < 0,02$) e hiperáridas ($IA < 0,05$). O CGEE (2016) confirma que o NEB não possui áreas dentro dessas classificações. Logo, Sergipe segundo a classificação climática proveniente do IA possui 3

(três) climas: Subúmido úmido, Subúmido Seco e Semiárido, sendo o primeiro o clima predominante do Estado (49%-54%), seguido da região semiárida (26% - 31%).

Ao analisar a progressão da faixa semiárida de Sergipe, nos dois períodos aqui considerados, percebe-se um aumento de área de 5%, sendo este similar ao percentual que foi observado para a chuva MLT anual para valores inferiores a 800 mm (4%). Somado a essa constatação, percebe-se também uma proximidade entre as isolinhas de IA com valor de 0,5 e isolinhas de chuva de 800 mm. Tal constatação vai novamente ao encontro do observado por Cabral Júnior e Bezerra (2018), os quais afirmam que a chuva é a variável dominante no IA.

O IA permitiu identificar áreas suscetíveis à desertificação. Foram encontradas áreas com alta (0,2 - 0,5) ou moderada (0,5 - 0,65) suscetibilidade à desertificação. As regiões com alta suscetibilidade estão situadas do noroeste e sudoeste do estado de Sergipe.

Figura 19. Isolinhas da MLT da precipitação anual dos períodos: (A) 1961 a 1990 e (B) 1991 a 2020, e percentual da área do Estado para as faixas de precipitação consideradas.

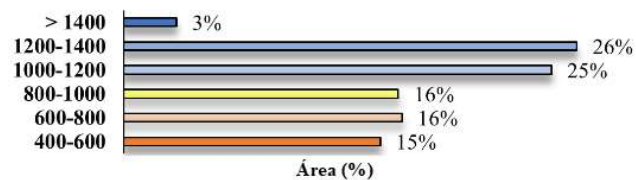
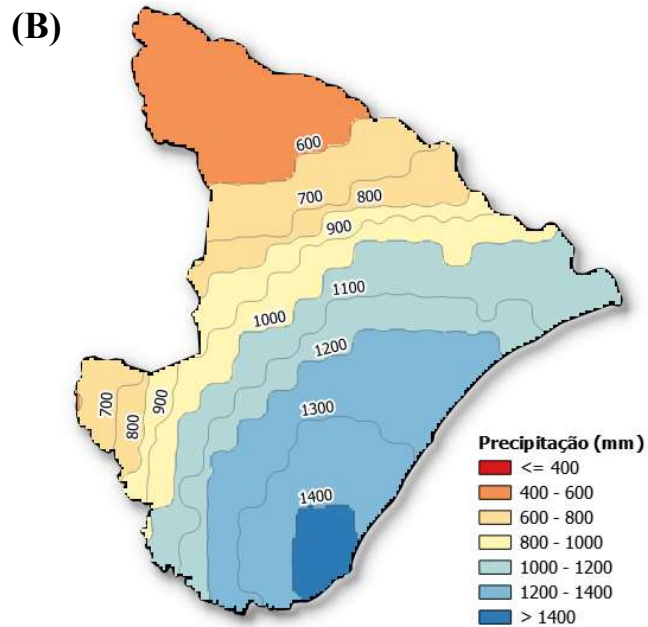
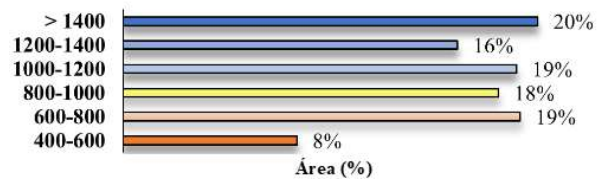
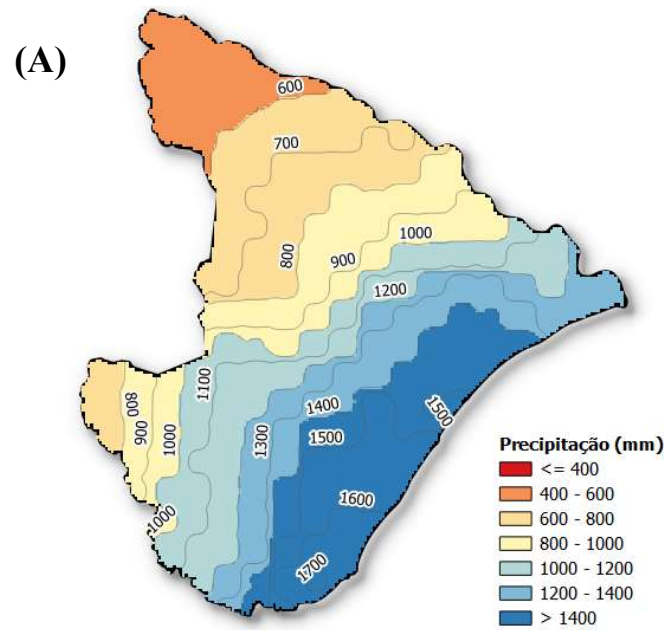


Figura 20. Isolinhas da MLT da evapotranspiração anual dos períodos: (A) 1961 a 1990 e (B) 1991 a 2020, e percentual da área do Estado para as faixas de evapotranspiração consideradas.

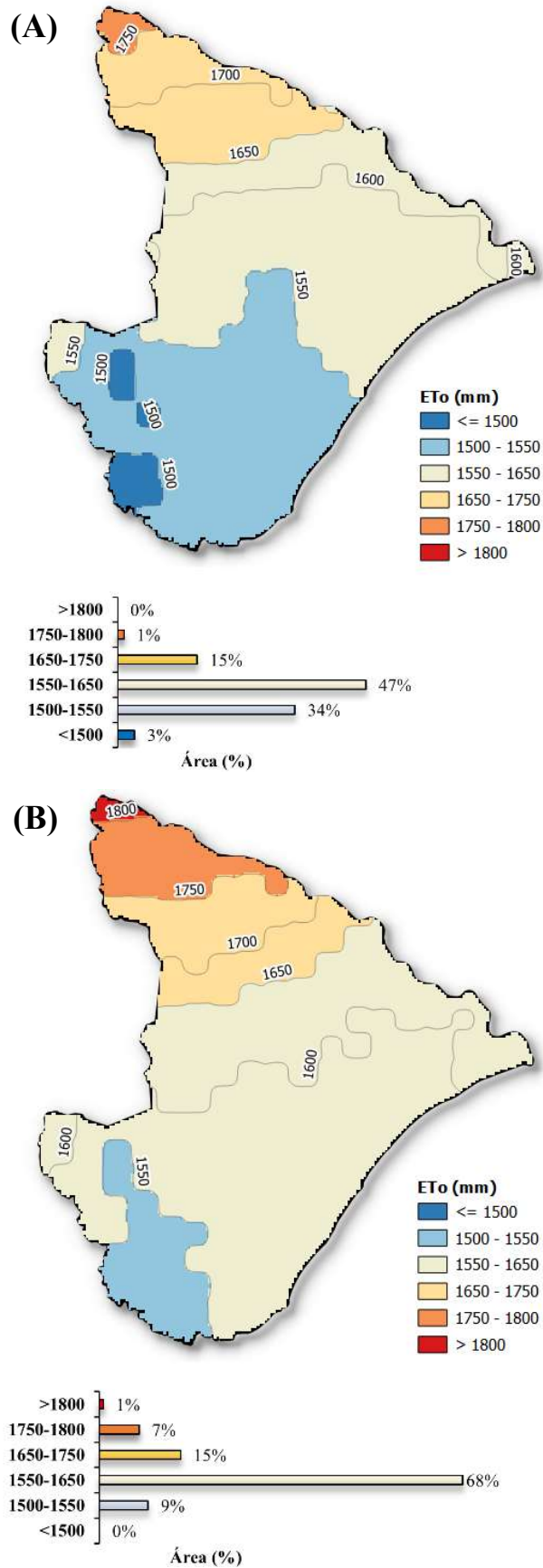
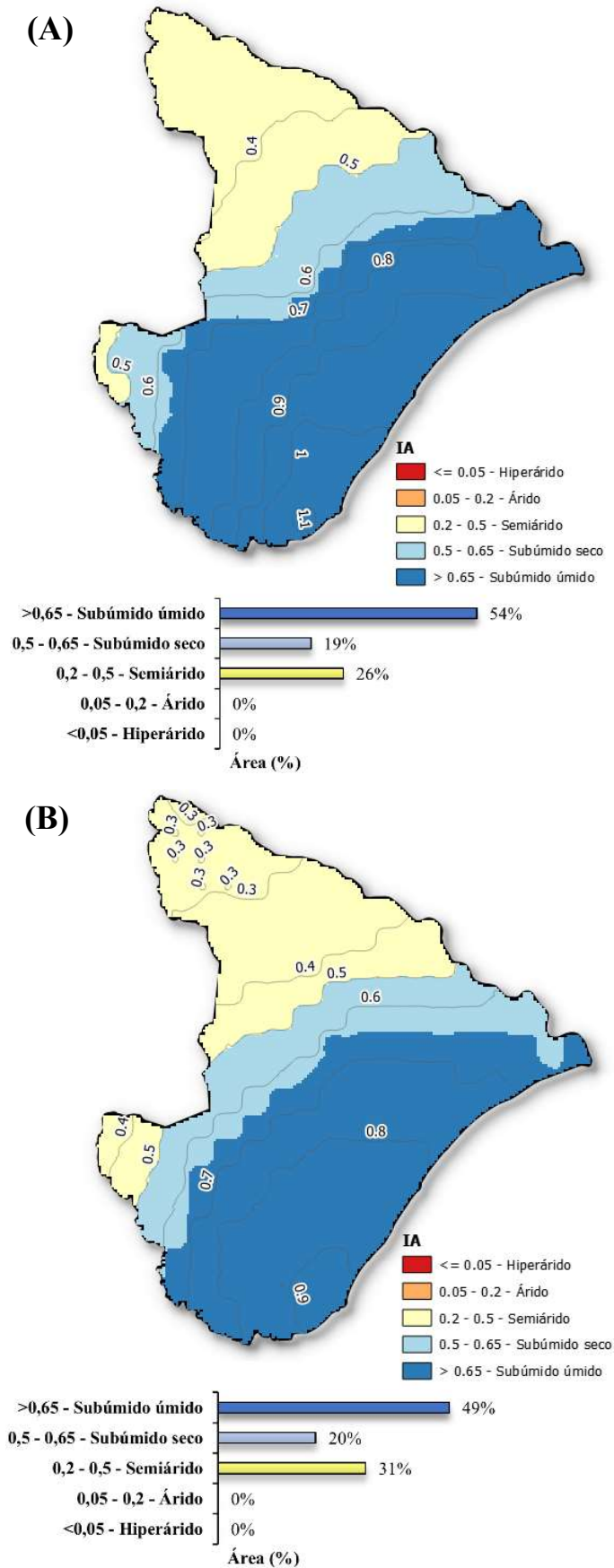


Figura 21. Isolinhas da MLT do índice de aridez anual dos períodos: (A) 1961 a 1990 e (B) 1991 a 2020, e percentual da área do Estado para as faixas de índice de aridez consideradas.



b) Análise Espacial da MLT do Trimestre Mais Úmido (MLT_{TMU})

As análises espaciais da MLT_{TMU} da precipitação e da ET_o , para os períodos considerados nesse trabalho, são ilustradas nas Figuras 22 e 23. Além da espacialização dessas variáveis também foram construídas isolinhas e um gráfico de barras como forma de quantificar as áreas do estado de Sergipe dentro das faixas de valores da variável considerada.

Quanto à precipitação da MLT_{TMU} (Figura 22), percebe-se, assim como na análise espacial anual, que os valores decresceram no sentido do litoral para o interior do Estado.

As isolinhas precipitação MLT_{TMU} variaram de 200 mm a 700 mm, no período compreendido entre 1961 a 1990, e variaram entre 200 a 600 mm, no período compreendido entre 1991 a 2020. Consta-se assim uma redução de 100 mm nos maiores valores da chuva MLT_{TMU} .

Espacialmente verificam-se algumas alterações em algumas faixas de precipitações, principalmente no litoral. Nas faixas de maiores precipitações foram constatadas as maiores variações entre os períodos analisados. Áreas com valores de chuva do MLT_{TMU} maiores a 650 mm passaram a não existir, quando considerado o período de 1991 a 2020. Essa redução representou uma diminuição de área nessa faixa de 19%. Em contrapartida a faixa de precipitação média com valores entre 550 mm e 650 mm teve um aumento de 18% do período de 1961 a 1990 para o período de 1991 a 2020. Essa constatação juntamente com a análise da Figura 22 permite concluir que praticamente toda a área do estado de Sergipe (litoral) que possuía valores médios de chuva no TMU superiores a 650 mm foi convertida em área com precipitação na faixa entre 550 mm e 650 mm.

Quanto à ET_o da MLT_{TMU} (Figura 23), percebe-se que suas isolinhas tiveram uma variação entre 280 mm a 300 mm, entre 1961 a 1991, e 270 mm a 300 mm, quando considerado os anos de 1991 a 2020. Consta-se assim uma redução de 10 mm nos menores valores das isolinhas ET_o MLT_{TMU} . Na análise espacial da ET_o MLT anual, ao contrário, foi observado um aumento nos maiores valores da MLT dessa variável. Esse comportamento divergente também foi verificado nas análises estatísticas, quando a ET_o do TMU teve um comportamento estacionário em todas as bacias e a ET_o anual apresentou tendência crescente em algumas bacias. Como discutido anteriormente, mesmo ocorrendo esse comportamento divergente entre as análises anuais e do TMU, foi visto que a ET_o MLT_{TMU} tinha pouca representatividade em relação a ET_o MLT anual, em torno de 17,5% a 18,4% (Tabela 4). Sendo assim, mesmo havendo uma diminuição de 10 mm nas isolinhas da ET_o MLT_{TMU} entre os períodos analisados, esse fato pode ser considerado pouco representativo quando se comparado aos valores anuais.

Espacialmente também se percebe que o estado de Sergipe possui maior percentual de área na faixa de ETo entre 280 mm a 290 mm, 67% (1961-1990) e 58% (1991-2020). Inclusive, foi nesta que ocorreu a segunda maior variação de área (redução de 9%), sendo menor apenas que a faixa de 270 mm a 280 mm a qual teve um acréscimo de 11% de área. Ao analisar esses percentuais e as Figuras 23.A e 23.B, infere-se que basicamente houve uma permutação entre essas faixas.

Por fim, lembrando as análises estatísticas básicas das variáveis P e ETo do TMU (Tabela 4), foi verificado, na ocasião, que a bacia do São Francisco foi aquela que apresentou os menores índices de precipitação e maiores índices de evapotranspiração. Nas Figuras 22 e 23 observam-se que os menores valores de precipitação e maiores índices de evapotranspiração estão localizados, predominantemente, na região norte do estado de Sergipe, onde fica localizada a bacia hidrográfica do São Francisco.

Figura 22. Isolinhas da precipitação MLT_{TMU} dos períodos: (A) 1961 a 1990 e (B) 1991 a 2020, e percentual da área do Estado para as faixas de índice de aridez consideradas.

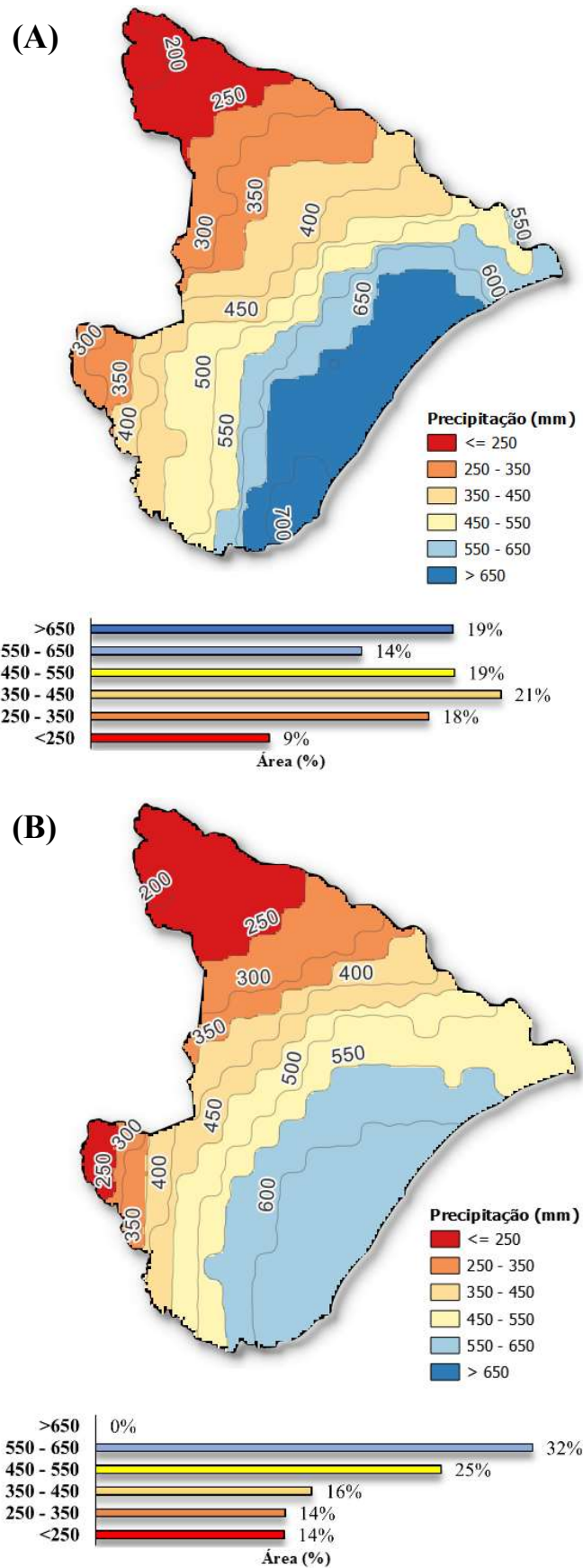
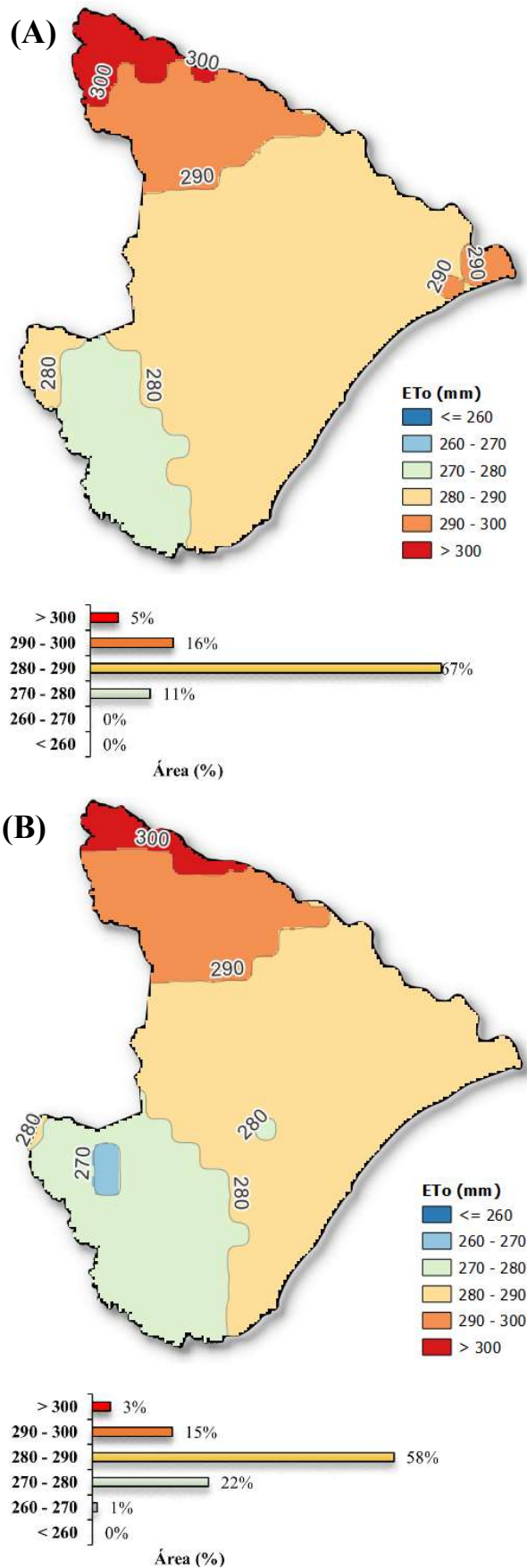


Figura 23. Isolinhas da evapotranspiração MLT_{TMU} dos períodos: (A) 1961 a 1990 e (B) 1991 a 2020, e percentual da área do Estado para as faixas de índice de aridez consideradas.



c) Análise da MLT do Trimestre Mais Seco (MLT_{TMS})

As análises espaciais da MLT_{TMS} da precipitação e da ET_o , para os períodos considerados nesse trabalho, são ilustradas nas Figuras 24 e 25. Além da espacialização dessas variáveis também foram construídas isolinhas e um gráfico de barras como forma de quantificar as áreas do estado de Sergipe dentro das faixas de valores da variável considerada.

As isolinhas da precipitação da MLT_{TMS} (Figura 24) variaram entre 80 mm a 180 mm, quando considerado o período de 1961 a 1990, e variaram entre 80 mm a 140 mm, quando considerado o período entre 1991 a 2020. Percebe-se assim uma redução de 40 mm nas isolinhas com os maiores valores. Tais reduções também foram detectadas nas análises espaciais da MLT anual e na MLT_{TMU} .

Ao observar as áreas das diversas faixas de precipitação, percebe-se que a maior variação aconteceu justamente na maior faixa de chuva MLT_{TMS} (> 140 mm). Nesta aconteceu uma redução de 20% da área do Estado de Sergipe, quando considerados os dois períodos avaliados nesse estudo. Por sua vez, faixas de menores precipitações tiveram um avanço nas áreas do Estado.

Ao analisar as isolinhas da ET_o MLT_{TMS} (Figura 25) foi verificado que elas variaram entre 460 mm a 540 mm, quando considerado o período entre 1961 a 1990, e 480 mm a 560 mm, quando considerado o período entre 1991 a 2020. Logo, verificam-se aumentos de 20 mm nas isolinhas da ET_o do TMS tanto no limite inferior bem como no limite superior. Na análise espacial da ET_o MLT anual também foram detectados aumentos nesses dois limites.

A análise espacial da ET_o MLT_{TMS} permitiu verificar que em termos de área, ao observar o gráfico de barras, o estado de Sergipe apresentou significativa alteração, principalmente, nas faixas de menor valor, sendo elas a faixa de valores inferiores a 480 mm, a qual teve uma redução de 38%, e a faixa de valores entre 480 mm a 500 mm, a qual teve um aumento de 23%. Apesar de menos significativa, percebe-se também um avanço de 11% na faixa de maior valor dessa variável (> 540 mm).

Relembrando as análises estatísticas básicas das variáveis P e ET_o do TMS (Tabela 6), foi verificado, na ocasião, que a bacia do São Francisco foi aquela que apresentou os menores índices de precipitação e maiores índices de evapotranspiração. Ao observar as Figuras 24 e 25 nota-se que a explicação para essa criticidade no São Francisco é a presença dos menores índices de precipitação e maiores índices de evapotranspiração nessa região.

Figura 24. Isolinhas da precipitação MLT_{TMS} dos períodos: (A) 1961 a 1990 e (B) 1991 a 2020, e percentual da área do Estado para as faixas de índice de aridez consideradas.

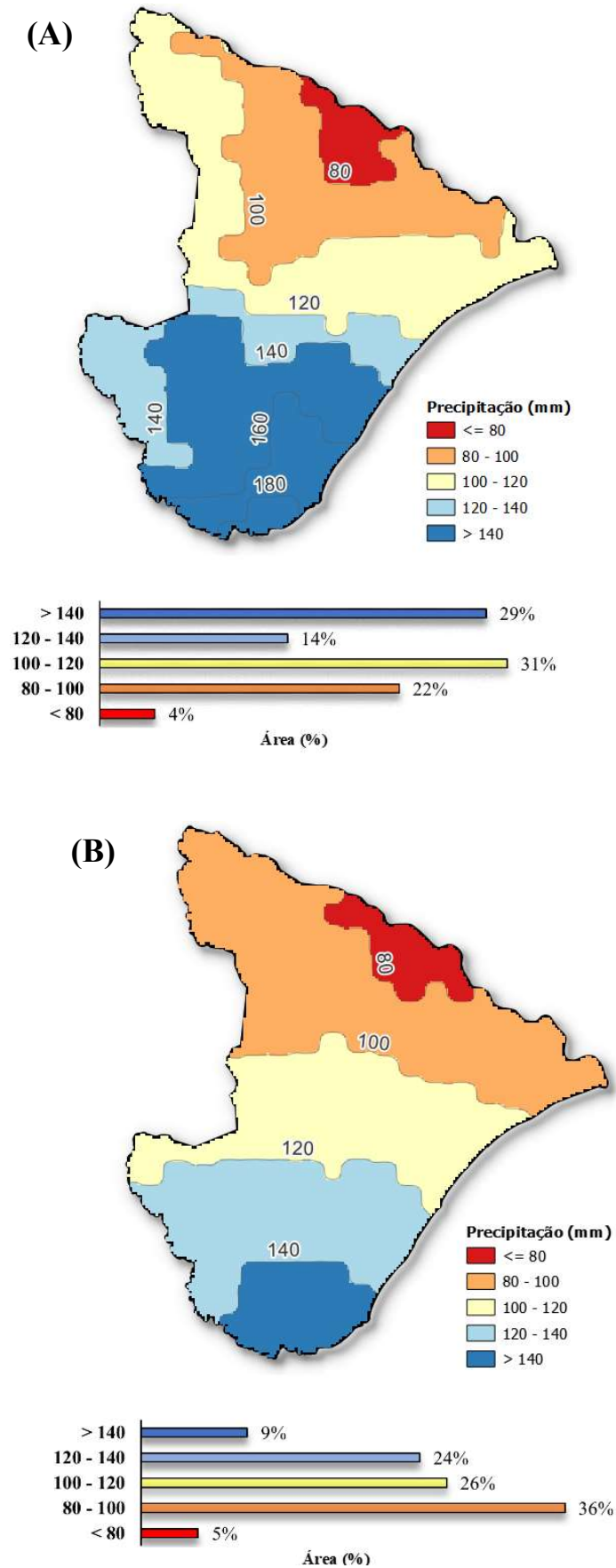
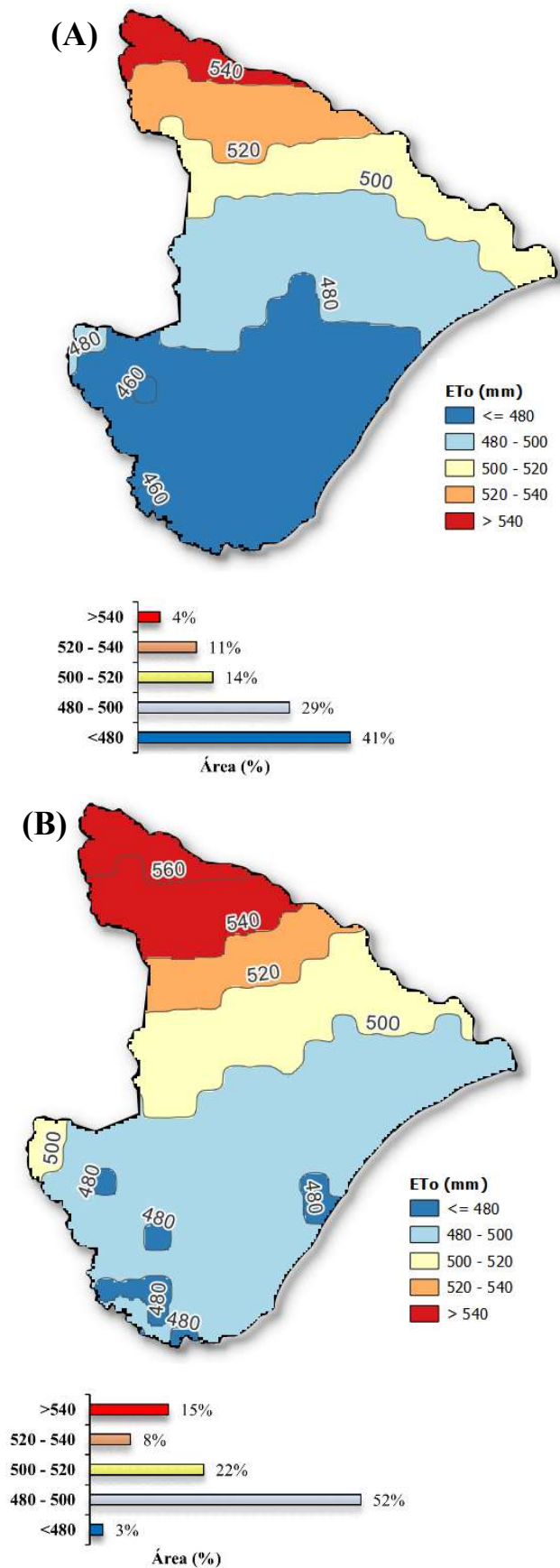


Figura 25. Isolinhas da evapotranspiração MLT_{TMS} dos períodos: (A) 1961 a 1990 e (B) 1991 a 2020, e percentual da área do Estado para as faixas de índice de aridez consideradas.



Realizadas essas análises no espaço e no tempo ressalta-se a importância da continuidade desse monitoramento tamanha a representatividade delas para o ciclo hidrológico, em um contexto de disponibilidade hídrica e suscetibilidade à desertificação, visando sempre otimização das políticas públicas com foco na mitigação de riscos, como também destacado por Bohn et al. (2020). Fato incontestável é que mudanças nas variáveis climáticas da região estão acontecendo. Logo ações preventivas devem orientar as decisões futuras, visando reduzir ao máximo os danos, especialmente para os grupos mais vulneráveis.

Também é pertinente mencionar que apontar os fatores que provocam mudanças na dinâmica dessas variáveis é uma tarefa complexa. Para exemplificar, lista-se alguns dos fatores que foram encontrados em estudos científicos e que provocam mudanças nas variáveis aqui estudadas, sendo elas: mudança no uso e ocupação da terra, variabilidade climática, alterações na Temperatura da Superfície do Mar (TSM), Oscilação Decadal do Pacífico (ODP), entre outras. (BOHN et al. 2020; CABRAL JÚNIOR; AMORIM et al., 2020; MARENGO et al. 2011). Logo, torna-se importante também que estudos continuem sendo realizados de forma a complementar e aprofundar os conhecimentos aqui obtidos no que se refere a dinâmica climática do estado de Sergipe.

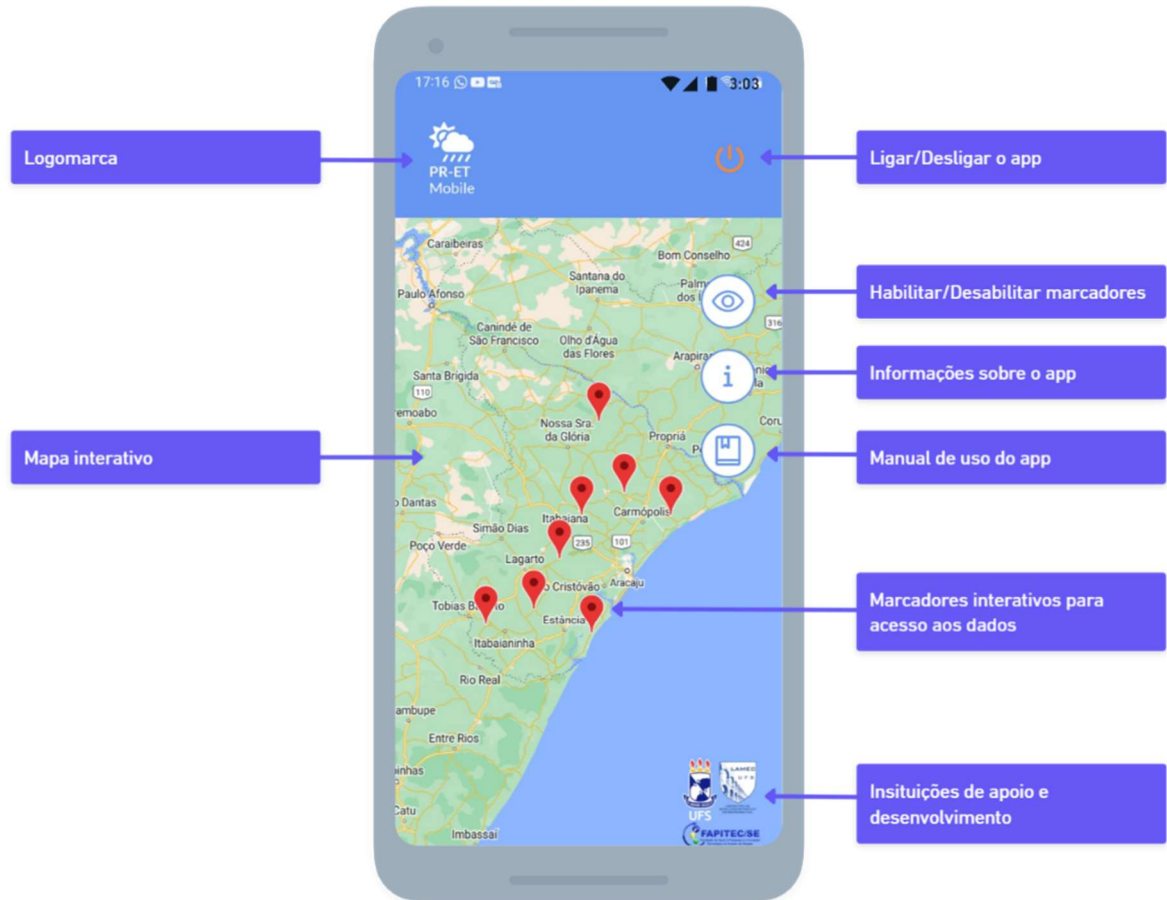
4.1.4 Aplicativo *Mobile*

O aplicativo desenvolvido nesta pesquisa foi denominado de PR-ET *Mobile*. A interface gráfica do aplicativo é ilustrada na Figura 26.

Esse aplicativo foi desenvolvido para iOS e Android, contudo está disponível apenas para dispositivos Android. Ele tem o intuito de disponibilizar informações gráficas sobre a precipitação (P), evapotranspiração (ET_o) e o índice de aridez (IA) em Sergipe.

A concepção desse app teve o intuito de tornar a interação do usuário o mais amigável possível. O app possui (Figura 26): a) interface inicial com um mapa interativo; b) marcadores colocados sobre o mapa, que permitem a interação do usuário, a partir do toque, de modo a obter informações sobre P, ET_o e IA; c) menu lateral com 3 botões, sendo eles para: habilitar e desabilitar os marcadores, obter informações sobre o aplicativo e ter acesso ao manual de uso do app; d) botão para desligar o app.

Figura 26. Tela inicial do aplicativo PR-ET mobile.



Fonte: Produzido nesta pesquisa (2023).

Supondo que o usuário toque em um dos marcadores do mapa (Figura 26), ele será redirecionado para a tela da Figura 27. Nesta serão mostrados: a) *card* com informações sobre o marcador selecionado, são elas: nome, bacia, latitude/longitude, última atualização. b) gráficos com informações sobre P, ETo e IA.; c) informações sobre a Média de Longo Termo (MLT); d) componente *slider*, que permite ao usuário saber a quantidade de gráficos além de permitir saber qual gráfico ele está visualizando; e) título da variável acima do respectivo gráfico; f) botão para retornar a tela inicial e g) botão para desligar o app.

Sobre o *card* algumas observações são necessárias. O nome atribuído no campo “Nome” refere-se à bacia em que o marcador está localizado. Apesar de parecer redundante com o campo “Bacia”, essa opção foi feita pensando em futuras implementações as quais podem demandar que o nome tenha informação distinta da bacia hidrográfica. As coordenadas dos campos “Latitude” e Longitude” são referentes a localização de cada marcador. Eles foram posicionados próximos aos centros de cada uma das 8 (oito) bacias hidrográficas do estado de

Sergipe, ou seja, cada marcador representa uma bacia. E por último, o campo “Última Atualização” refere-se a data da última atualização feita pelos desenvolvedores. Essa atualização é automática e não necessita nenhuma ação do usuário.

Figura 27. Tela com informações sobre o marcador selecionado do aplicativo PR-ET mobile.



Fonte: Produzido nesta pesquisa (2023).

Apesar de estar claro ao longo da metodologia, reitera-se que os gráficos levaram em consideração o ano hidrológico.

Recentemente, foram submetidos ao junto ao Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI) o pedido para registro de marca e *software*, sendo que este último já foi concedido (MENDES e SOUZA, 2023).

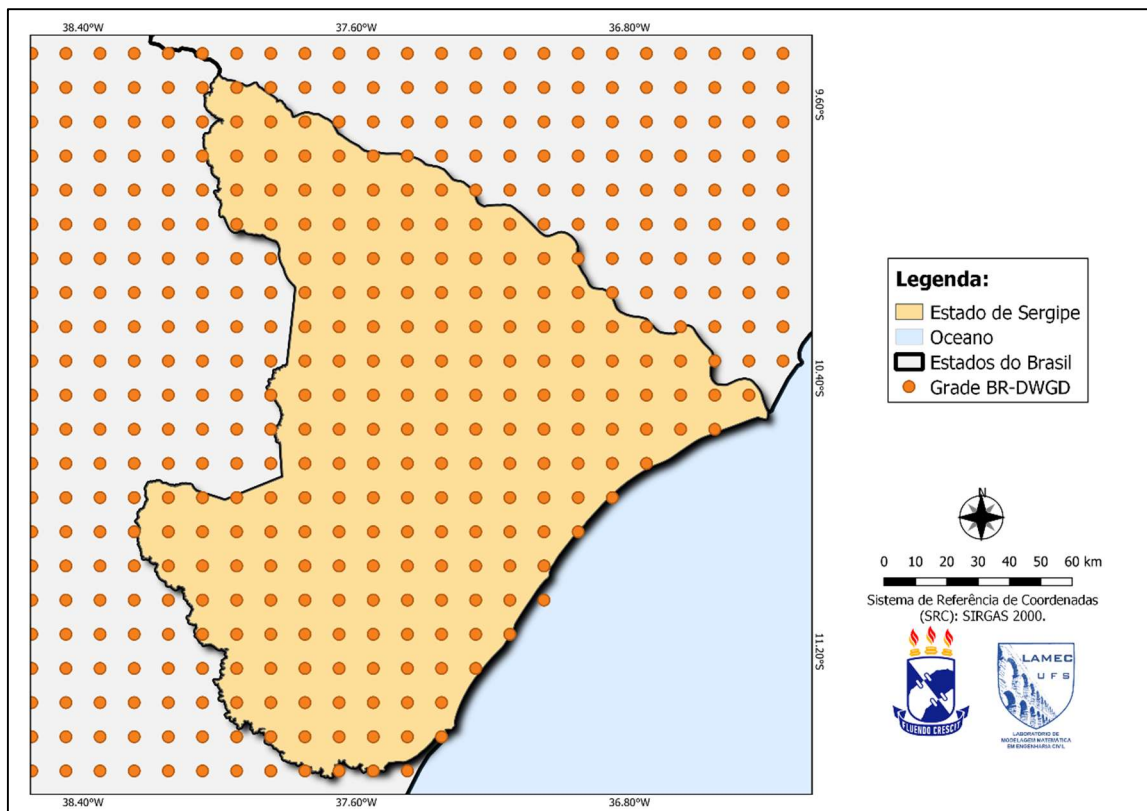
Por fim, é importante comunicar que nesse momento, devido a limitações de caráter financeiro, o aplicativo não será disponibilizado para todo o público, apenas para pessoas que tenham convergência com a temática, pois o alto uso poderia gerar custos aos desenvolvedores.

4.2 DEFINIÇÃO DE CRITÉRIO ALTERNATIVO PARA DELIMITAÇÃO DO SEMIÁRIDO SERGIPANO

4.2.1 Aquisição dos dados, cálculo do balanço e espacialização dos dados

Com a rotina de programação desenvolvida, foram extraídos os dados de P e ETo da base BR-DWGD. De posse dos dados, ainda com auxílio da linguagem de programação, procedeu-se os cálculos do BH (Equação 13) e do %Neg (Equação 14) para os passos de tempo diário e mensal, para cada ponto da grade de dados e para os anos de 1981 a 2010 (período utilizado na calibração do novo critério e que coincide com a delimitação consolidada de 2017 realizada pela SUDENE). Os resultados espacializados são apresentados na Figura 28.

Figura 28. Espacialização da grade BR-DWGD.



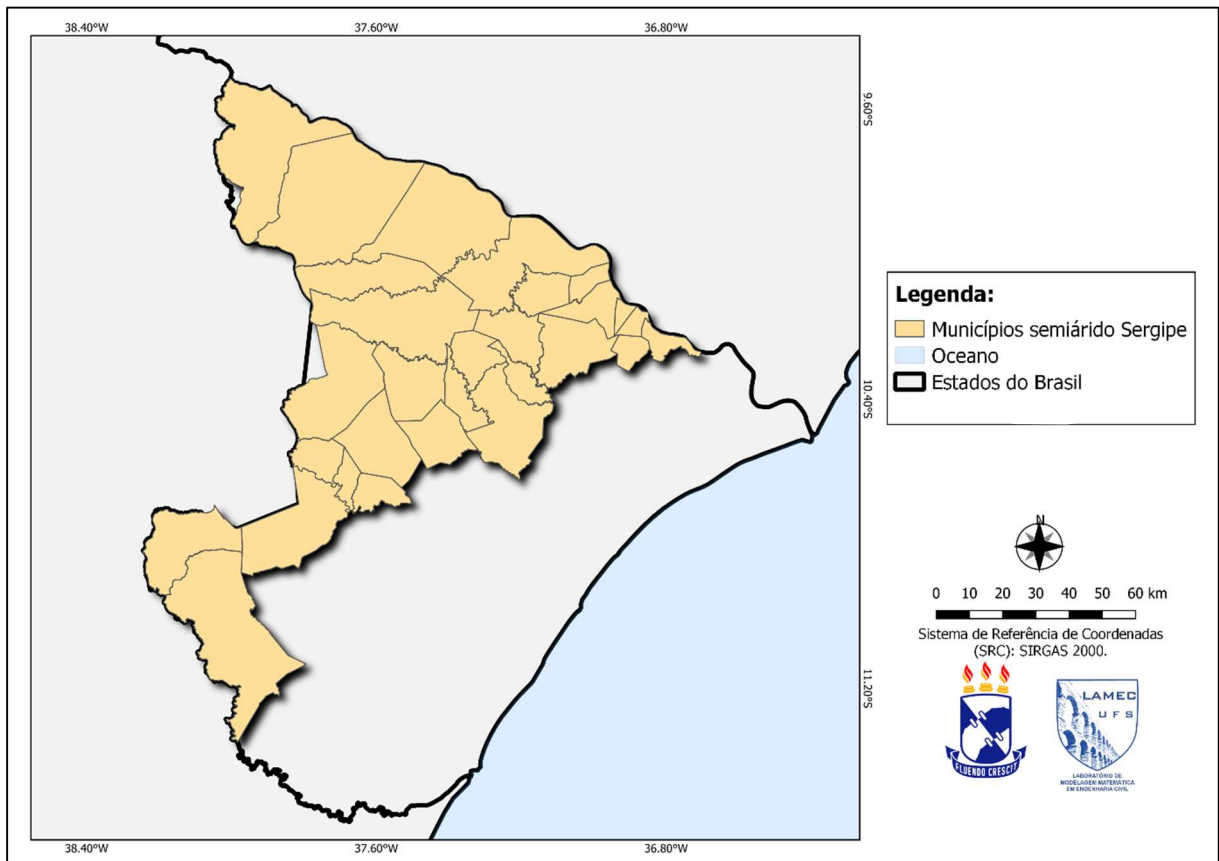
Fonte: Produzido nesta pesquisa (2023).

Os pontos ilustrados na Figura 28 correspondem ao centro de cada pixel da base BR-DWGD. Para cada ponto existem informações do %Neg diário e mensal.

4.2.2 Calibração e obtenção do percentual a ser adotado

A calibração teve como referência, para o ajuste dos parâmetros do critério proposto, a última delimitação do semiárido consolidada pela SUDENE, realizada em 2017. A Figura 29 ilustra os 29 municípios sergipanos que foram inseridos nessa delimitação. O período de dados utilizados nessa delimitação foi de 1981 a 2010.

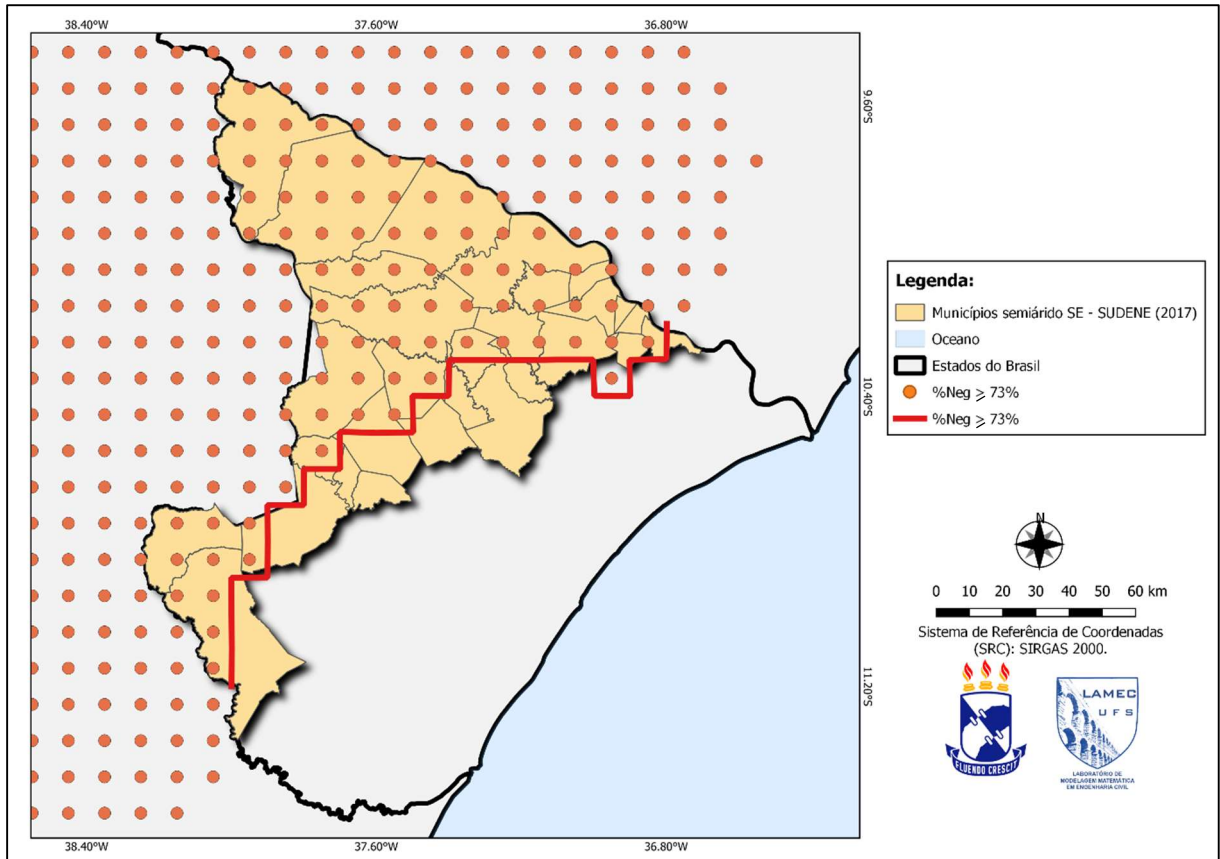
Figura 29. Municípios do semiárido de Sergipe 2017.



Fonte: Produzido nesta pesquisa (2023).

De posse dos resultados apresentados nas Figuras 28 e 29, buscou-se, através da tentativa e erro e com auxílio da ferramenta de filtro do QGIS, encontrar os melhores resultados para o conjunto %Neg e passo de tempo. Os resultados que tiveram melhor aderência à região semiárida foram aqueles em foram utilizados %Neg \geq 73% e o passo de tempo mensal. Em suma, pode-se interpretar que os melhores resultados foram aqueles em que foram filtrados os pontos onde a P foi menor que a ETo ($BH < 0$) no mínimo em 73% dos meses (Figura 30).

Figura 30. Calibração dos parâmetros do critério.



Fonte: Produzido nesta pesquisa (2023).

Recomenda-se construir, com o auxílio do QGIS, uma linha que contorne as bordas dos pontos filtrados, pois esses são os centros do pixel de 0,1° referente a base BR-DWGD. Esse procedimento facilita a seleção dos municípios a serem enquadrados na zona semiárida e pode ser visto na Figura 30.

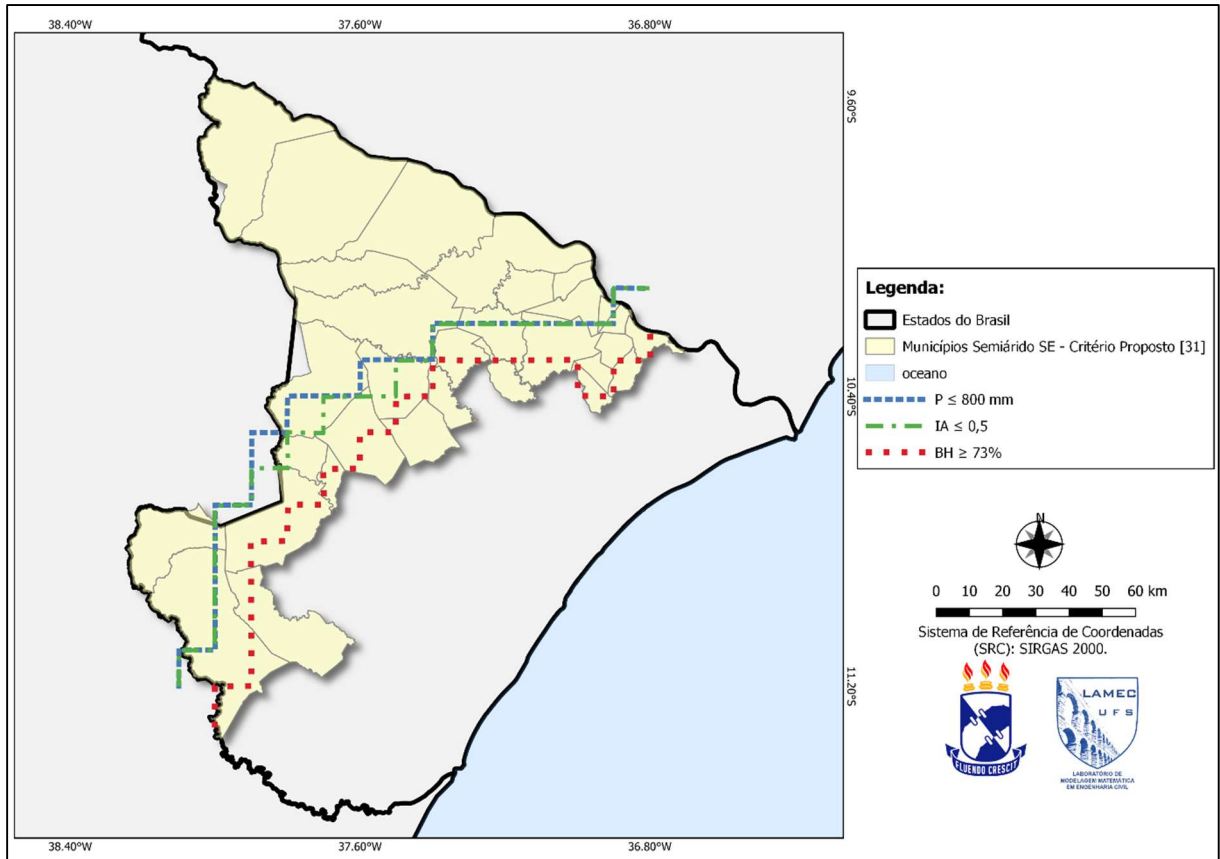
4.2.3 Formalização do critério e delimitação do Semiárido

Neste item formaliza-se a sugestão dada por este trabalho como alternativa à delimitação da região semiárida para o estado de Sergipe. Os critérios aqui sugeridos são:

- Precipitação pluviométrica média anual igual ou inferior a 800mm;
- Índice de Aridez de Thorntwaite igual ou inferior a 0,50; ou
- Saldo negativo entre a Precipitação e a Evapotranspiração em escala mensal em no mínimo 73% do período considerado.

A Figura 31 ilustra os 31 municípios enquadrados na região semiárida fazendo uso dos critérios apresentados e considerando os anos de 1991 a 2019.

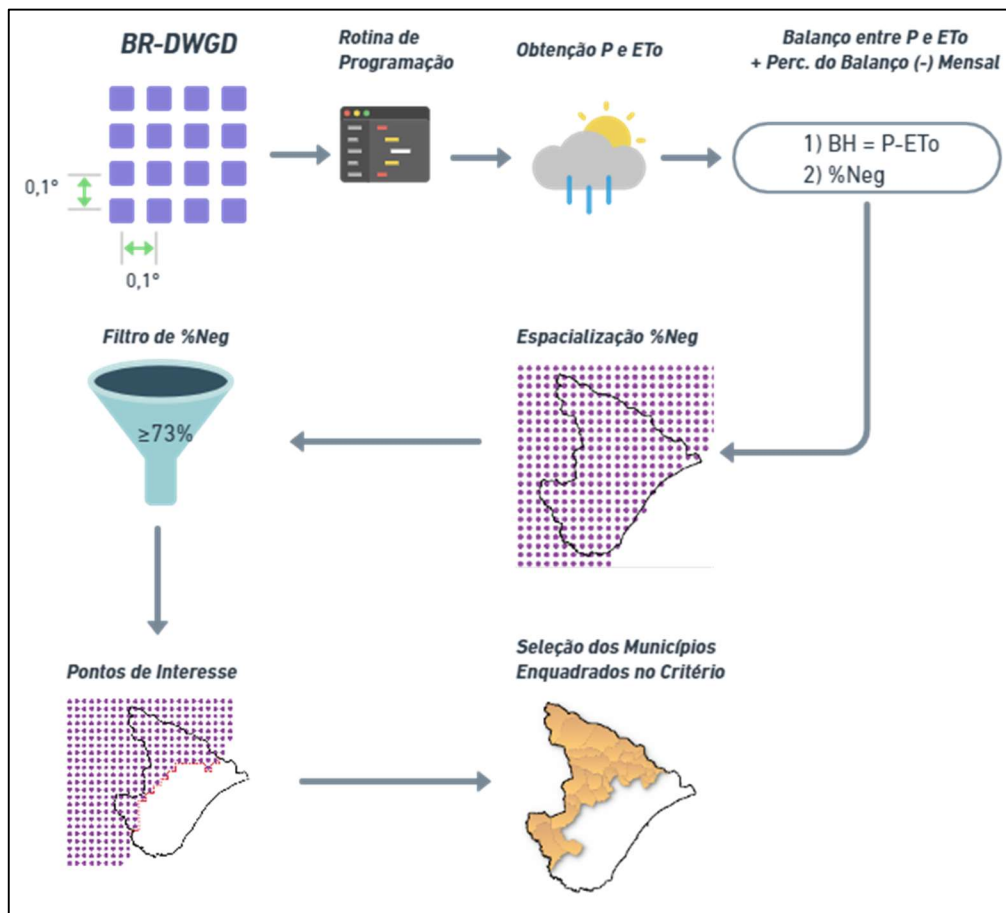
Figura 31. Delimitação Semiárido fazendo uso do critério proposto.



Fonte: Produzido nesta pesquisa (2023).

Para facilitar a replicação do critério proposto, foi criado um fluxo de atividades (Figura 32) que resume todos os passos desde a obtenção dos dados até a seleção dos municípios a serem enquadrados na região semiárida do estado de Sergipe.

Figura 32. Fluxo para obtenção dos municípios a serem enquadrados no semiárido pelo critério proposto.



Fonte: Produzido nesta pesquisa (2023).

4.2.4 Comparação entre delimitações do semiárido

A Figura 33 ilustra os municípios de Sergipe que compõem o semiárido segundo a delimitação da SUDENE de 2017, da SUDENE de 2021 (preliminar) e a pelo critério proposto neste trabalho.

A delimitação da SUDENE de 2021 enquadrou 23 municípios de Sergipe na região semiárida, 6 municípios a menos em relação aos 29 municípios enquadrados em 2017. Essa diferença se deve à retirada e inclusão de 7 e 1 municípios, respectivamente, quando comparadas essas duas delimitações.

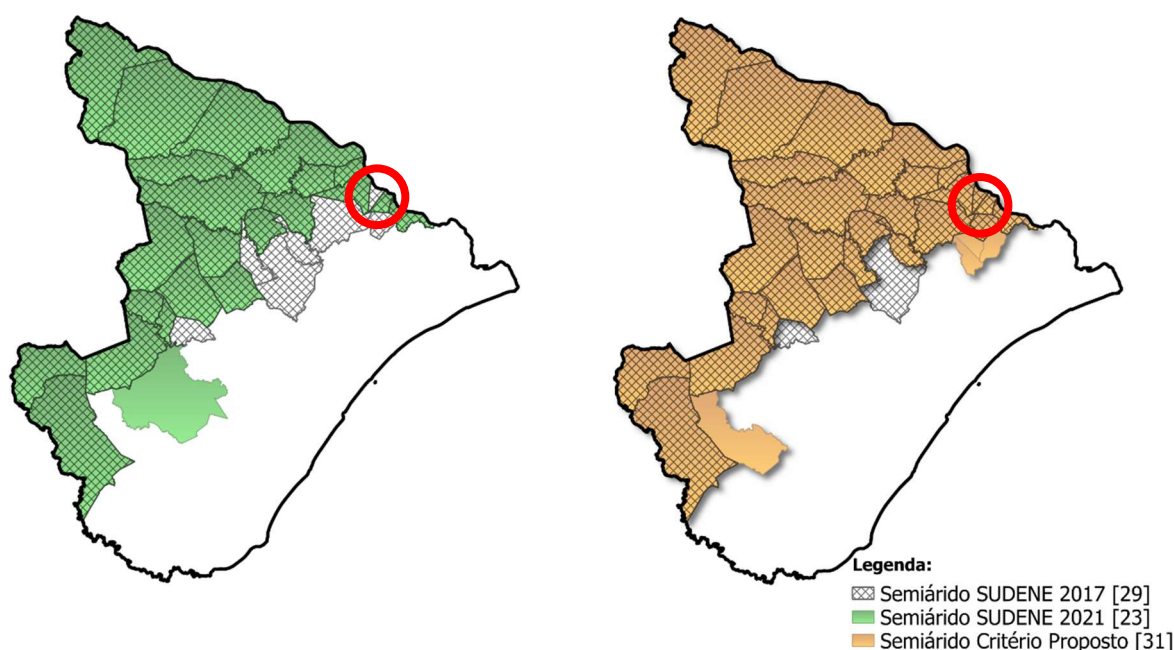
Quanto à delimitação do semiárido pelo critério proposto, enquadraram-se nessa região 31 municípios, 2 a mais que a delimitação de 2017. Diferença ocasionada pela inclusão e retirada de 4 e 2 municípios, respectivamente, quando comparados esses dois produtos.

Essas primeiras análises permitem inferir que o panorama climático em boa parte de Sergipe, ao analisar apenas as delimitações de 2017 e 2021 da SUDENE, está tendendo a uma situação menos crítica, seja por aspectos pluviométricos, evaporimétricos ou no que se refere ao déficit hídrico, dado que os critérios para tal delimitação fazem uso desses parâmetros.

No entanto, estudos vêm mostrando que a situação no NEB vai no sentido contrário a esse cenário inferido. Marengo e Bernasconi (2015) sugerem tendências de aumento de secas, redução de chuva, aumento de temperatura e déficit hídrico na região. Carvalho et al. (2020) identificaram, em diversas regiões do Nordeste, redução do número de dias de precipitação, redução na precipitação bem como tendência de crescimento da temperatura.

Por outro lado, a delimitação utilizando o critério proposto, apesar de apontar a retirada de 2 municípios da região semiárida, em termos absolutos foi ao encontro do que apontam os estudos e inseriu uma maior quantidade de municípios dentro do semiárido.

Figura 33. Comparação das regiões semiáridas.

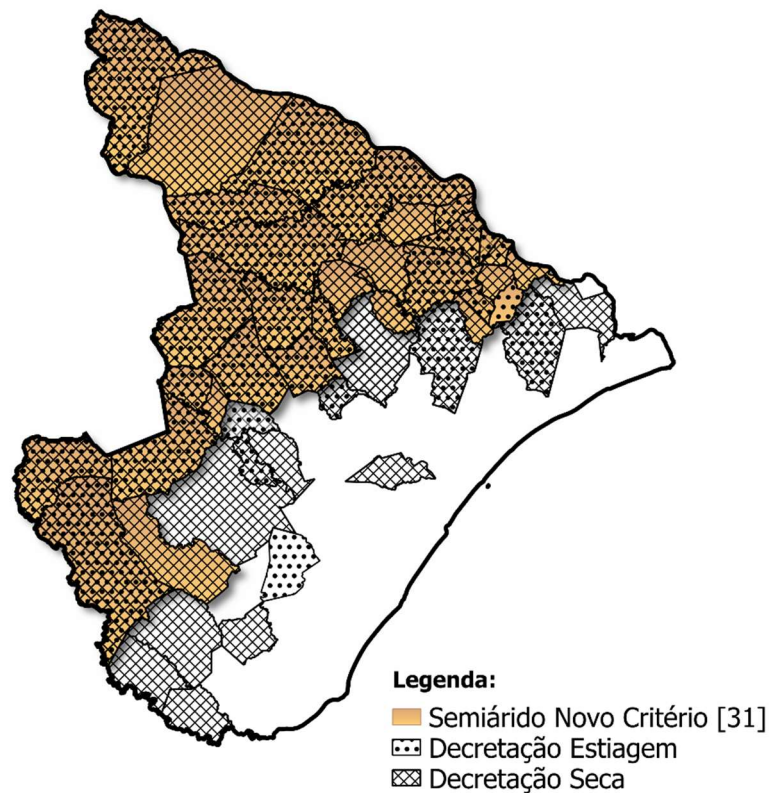


Fonte: Produzido nesta pesquisa (2023).

Outro ponto que chama atenção na delimitação preliminar da SUDENE de 2021 é a existência de uma descontinuidade no município de Amparo de São Francisco (círculo vermelho da Figura 33), dado que os municípios adjacentes a ele se enquadraram na região semiárida. Tal fato não foi constatado na delimitação do semiárido pelo critério proposto.

Por fim, como forma de verificar se há coerência na delimitação do semiárido sergipano pelo critério proposto, fez-se uma comparação com os dados da SUPDEC (2013-2020) (Figura 34). Essa comparação mostra a coerência dos resultados produzidos ao utilizar o critério proposto, uma vez que em todos os municípios enquadrados no semiárido houve pelo menos um decreto de seca e/ou estiagem pela SUPDEC.

Figura 34. Comparação semiárido pelo critério proposto e decretações de seca e estiagem, entre 2013-2020, da SUPDEC do estado de Sergipe.



Fonte: SUPDEC (2023).

5. CONCLUSÕES

O presente estudo forneceu uma visão ampla no tempo e espaço para as variáveis de precipitação, evapotranspiração e do índice de aridez (IA) no estado de Sergipe, tendo como fonte de dados a base de dados BR-DWGD.

Fazendo um breve panorama em relação a precipitação foi mostrado que não foi verificada a existência de tendência ao longo do tempo em todas as bacias e em todos os agrupamentos (anual, TMU e TMS). Contudo, no contexto espacial, ao proceder uma análise da precipitação MLT, em todos os agrupamentos e nos recortes temporais utilizados, pôde-se perceber algumas modificações (lembrando que essa avaliação não pode ser chamada de tendência). Destaca-se, por exemplo, modificações representativas que estão acontecendo nas faixas de maiores precipitação, geralmente, no litoral do Estado de Sergipe. Essas movimentações vão no sentido de diminuição dos índices pluviométricos dessa região, apesar de ainda ser a área de maior índice pluviométrico. No interior do Estado, a exemplo da região semiárida, também está ocorrendo uma dinâmica de aumento de áreas com faixas de valores menores, porém de forma não tão expressiva como o que acontece com o litoral. Apesar de não ser tão expressiva, é nessa região que se encontra a população mais vulnerável aos fenômenos de seca e estiagem, logo é recomendável um constante monitoramento dessa região.

Na avaliação da ETo ao longo do tempo foi possível detectar a existência de tendências crescimento, particularmente, nas séries anuais e do TMS e em 5 (São Francisco, Japarutuba, Sergipe, Vaza-Barris e Real) das 8 bacias hidrográficas do Estado de Sergipe. Apesar de não ter sido possível detectar tendência na série de ETo do TMU foi visto que esta não apresenta grande representatividade no comportamento das séries anuais de ETo. No contexto espacial, também foi possível observar alterações nos valores da ETo MLT, em todos os agrupamentos e nos dois retratos temporais. Nos agrupamentos ETo MLT anual e ETo MLT_{TMS}, foram verificados movimentos de progresso de áreas com maiores valores de ETo, ao passo que na análise espacial ETo MLT_{TMU} o movimento foi inverso.

Finalizando as análises no tempo e espaço avaliou-se o IA. Este índice não apresentou tendência de crescimento ou decréscimo ao longo do tempo, assim como a precipitação anual. O presente trabalho associou isso ao fato da precipitação ser a variável dominante no IA, como foi verificado por alguns estudos, e evidenciado aqui em alguns momentos. A avaliação espacial desta variável permitiu mapear as regiões suscetíveis à desertificação, principalmente no noroeste e no sudoeste do Estado. Além disso, foi possível classificar o clima da região.

Nesse sentido, foi verificada a existência de 3 climas: Subúmido úmido, Subúmido Seco e Semiárido, sendo o primeiro o clima predominante do Estado, seguido da região semiárida.

Como forma de propagar as informações produzidas neste trabalho criou-se um aplicativo para Android denominado PR-ET *mobile*. Neste, é possível obter informações gráficas sobre a precipitação (P), evapotranspiração (ET_o) e o índice de aridez (IA) para todas as bacias hidrográficas de Sergipe. Reitera-se que ele não será disponibilizado para todo o público por questões financeiras.

Este trabalho também apresentou um critério alternativo para delimitação do semiárido sergipano, pautado basicamente na diferença mensal entre P e ET_o e utilizou apenas uma fonte de dados. A delimitação do semiárido pelo critério proposto mostrou-se viável, visto que os resultados apresentados tiveram concordância com as constatações verificadas nos estudos científicos para região do NEB. As delimitações da SUDENE enquadraram no semiárido sergipano 29 municípios em 2017 e 23 municípios em 2021 (estudo preliminar). Já o método proposto, utilizando intervalo similar ao estudo da SUDENE de 2021, enquadrou 31 municípios nessa região. Outro ponto observado foi a presença de descontinuidades na região semiárida de Sergipe elaborada pela SUDENE em 2021, fato não observado ao se comparar com a delimitação pelo critério proposto. Por fim, o semiárido delimitado pelo critério proposto, ao ser comparado com os dados da SUPDEC, se mostraram bastante coerentes, pois os municípios enquadrados nessa região apresentaram pelo menos um evento de seca e/ou estiagem, fenômenos frequentes e característicos do semiárido.

Cabe lembrar que todos os mapas e arquivos vetoriais (*shapefiles*) produzidos nesta pesquisa serão disponibilizados para toda sociedade através de uma pasta no Google Drive⁷.

Este estudo apresenta pontos que podem ser mais aprofundados e melhorados em futuras pesquisas de modo a compreender mais a temática, dado que se trata de um tema complexo e que vários agentes influenciam no comportamento das variáveis aqui estudadas. Dessa forma, podem ser avaliadas outras variáveis como: temperatura, radiação solar, umidade relativa, entre outras, e como estas influenciam e interagem com algumas das variáveis aqui estudadas. Também podem ser avaliados os impactos das alterações do uso do e cobertura da terra no Estado e como estas impactam e estão impactando as variáveis climáticas. Quanto à análise das séries temporais de P, ET_o e IA, sugere-se que sejam avaliadas outras características como a periodicidade dessas séries, efeitos de longa memória e correlação com a ocorrência de

⁷ Link para o drive:

https://drive.google.com/drive/folders/12IRdNqreRkIO8i4Up1Vbq2sPl5qtmBun?usp=drive_link

fenômenos como, por exemplo, ENOS e ODP. Já no tocante aos procedimentos metodológicos, especificamente sobre a discretização do estudo que foi realizado por bacia hidrográfica, sugere-se realizar análises também por Unidades de Planejamento (UP's) que no estado de Sergipe são 27.

REFERÊNCIAS

- ABREU, L. P.; MUTTI, P. R.; LIMA, K. C. **Variabilidade espacial e temporal da precipitação na bacia hidrográfica do Rio Parnaíba, Nordeste do Brasil**. Revista Brasileira de Meio Ambiente, v.7, n.2, 082-097, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3524759>.
- AHMAD, I.; TANG, D.; WANG, T.; WANG, M.; WAGAN, B. **Precipitation Trends over Time Using Mann-Kendall and Spearman's rho Tests in Swat River Basin, Pakistan**. Advances in Meteorology, v.2015, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1155/2015/431860>.
- AMORIM, A. C. B.; LUCIO, P. S.; SILVA, C. M. S.; RODRIGUES, D. T.; NETO, F. A. B. **Regionalização e Análise da Tendência da Precipitação do Rio Grande do Norte Associados a Padrões de TSM**. Revista Brasileira de Meteorologia, v.35, n.2, 269-280, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786352024>.
- BARROS, G. V. P.; CRUZ, M. A. S.; SILVA, A. A. G.; AMORIM, J. R. A.; NASCIMENTO, P. S. R. **Análise comparativa das precipitações diárias interpoladas e dados de estações na região dos tabuleiros costeiros**. XI Encontro De Recursos Hídricos Em Sergipe. Sergipe. 2018.
- BOHN, L.; LYRA, G.B.; JÚNIOR, J.F.O.; ZERI, M.; ZERI, G.C. **Desertification susceptibility over Rio de Janeiro, Brazil, based on aridity indices and geoprocessing**. International Journal of Climatology, v41, 2600-2614, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.6869>
- BRASIL. IBGE. **Cidades e Estados**. Disponível em: < <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/se.html>>. Acesso em: 25/02/2022.
- BRASIL. **Lei Nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19433.htm >. Acesso em: 14/03/2022.
- BRASIL. **Lei Nº 9.984, de 17 de julho de 2000**. Dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), entidade federal de implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos, integrante do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (Singreh) e responsável pela instituição de normas de referência para a regulação dos serviços públicos de saneamento básico. Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19984.htm#:~:text=LEI%20No%209.984%2C%20DE%2017%20DE%20JULHO%20DE%202000.&text=Disp%C3%B5e%20sobre%20a%20cria%C3%A7%C3%A3o%20da,H%C3%ADricos%2C%20e%20d%C3%A1%20outras%20prov%20id%C3%A2ncias.> Acesso em: 11/03/2022.
- CARDOSO, J.F.; SILVA, I.K.V.; LIMA, E. L. L. L.; COUTINHO, A. P. **Estimativa de evapotranspiração no semiárido brasileiro**. In: III Encontro Nacional de Desastres, 2023 2023. Rio de Janeiro. Anais <https://anais.abrhidro.org.br/jobs.php?Event=190>.

CARVALHO, A. A.; MONTENEGRO, A. A.; SILVA, H. P.; LOPES, I.; MORAIS, J. E. F.; SILVA, T. G. F. **Trends of rainfall and temperature in Northeast Brazil**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. Campina Grande, v.24, n.1, 15-23, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v24n1p15-23>.

CARVALHO, W. M.; COSTA, D. D.; JUNIOR, C. R. F. **Avaliação de diferentes fontes de dados de precipitação e seus impactos na simulação dos processos hidrológicos**. In: XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2019. Paraná. Anais <https://anais.abrhidro.org.br/jobs.php?Event=107>.

CAVALCANTI, I.F.A.; FERREIRA, N.J.; SILVA, M.G.A.J.; DIAS, M.A.F.S. **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo. 2015.

CGEE (Centro de Gestão e Estudos Estratégicos). **Desertificação, degradação da terra e secas no Brasil**. Brasília. 2016.

MILLER, B. Key takeaways from the UN report on the climate crisis. 9 de agosto de 2021. CNN. Disponível em: < <https://www.cnnbrasil.com.br/internacional/veja-as-principais-conclusoes-do-relatorio-do-ipcc-sobre-a-crise-climatica/> >. Acesso em: 15/02/2022.

CABRAL JÚNIOR, J. B. C.; SILVA, C. M. S.; ALMEIDA, H. A.; BEZERRA, B. G.; SPYRIDES, M. H. C. **Detecting linear trend of reference evapotranspiration in irrigated farming areas in Brazil's semiarid region**. Theoretical and Applied Climatology, 138, 215-225, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-019-02816-w>.

CABRAL JÚNIOR; BEZERRA, B. G. **Análises da evapotranspiração de referência e do índice de aridez para o Nordeste do Brasil**. Revista de Geociências do Nordeste, v.4, n.1, p. 71-89, 2018. DOI: 10.21680/2447-3359.2018v4n1ID14746.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para engenharia e ciências ambientais**. 2 ed.. Porto Alegre. Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), 2015.

COLLISCHONN, B.; TUCCI, C.E.M. **Relações Regionais entre Precipitação e Evapotranspiração Mensais**. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.19, n.3, p.205-214, 2014. DOI: 10.21168/rbrh.v19n3.p205-2014.

CRUZ, M. A. S.; SILVA, A., A., G.; AMORIM, J. R. A.; ALMEIDA, A. Q.; BRITO, J. I. B. **Tendências de alterações na precipitação na área de atuação da EMBRAPA Tabuleiros Costeiros**. In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 2017. Juazeiro, Petrolina. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/166588/1/Tendencias.pdf>. Acesso em: 15/02/2022.

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

DETZEL, D. H. M. **Modelagem de séries hidrológicas: Uma abordagem de múltiplas escalas temporais**. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos) - Universidade Federal do Paraná, UFPR. Curitiba, 2015.

DEV. **Size of Programming Language Communities in Q3 2021**. Disponível em: < <https://dev.to/development/size-of-programming-language-communities-in-q3-2021-44a9#:~:text=Nearly%2016.5M%20developers%20are%20using%20it%20globally.&text=4M%20developers%20joined%20the%20community,the%20past%20six%20months%20alone>. /> Acesso em: 17/03/2022.

DIAS, F. S. **Definição de rede adaptativa de monitoramento hidrometeorológico com suporte de sensoriamento remoto na bacia dos dois rios – RJ**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ. 2014.

DINIZ, M.T.M.; MEDEIROS, S.C.; CUNHA, C.J. **Sistemas Pluviométricos e Diversidade Pluviométrica em Sergipe**. Boletim Goiano de Geografia, v.34, n.1, p.17-34, 2014. DOI: <https://doi.org/10.5216/bgg.v34i1.29313>.

FUJITA, T. **Calibração e validação de um modelo hidrológico para a bacia hidrográfica do rio Ivaí**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR. Londrina. 2018.

GOIS, G., SOUZA, J.L., SILVA, P.R.T.; OLIVEIRA-JÚNIOR, J.F. **Caracterização da desertificação no estado de alagoas utilizando variáveis climáticas**. Revista Brasileira de Meteorologia, v.20, n.3, p.301-314, 2005.

GOIS, D.V.; MELO, F.P.; RUIZ-ESPARZA, D.P.B.; SOUZA, R. M. **Suscetibilidade à Desertificação na Sub-bacia Hidrográfica do Rio Jacaré–Sergipe**. In: Simpósio sobre as geotecnologias e geoinformação no Estado de Alagoas, 2016. Alagoas. Disponível em: https://dados.al.gov.br/catalogo/ro/dataset/4-anais-do-geoalagoas/resource/9bbddf45-6b62-4996-8bb4-5f07966726e6?view_id=8b3a62c1-8ee0-47ca-a4c2-5e3b3f752da8. Acesso em: 10/02/2022.

GOIS, D.V., MELO, F.P; SOUZA, R.M. **Risco à desertificação nos municípios de Canindé de são Francisco e Poço verde (SE)**. Revista Ciência Geográfica, v.26, n.1, p.103-126, 2022. DOI: <https://doi.org/10.18817/26755122.26.01.2022.2875>.

HARRIS, I.; OSBOM, T. J.; JONES, P.; LISTER, D. **Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset**. Scientific Data, 7, 109, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3>.

HIDROWEB. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao> . Acesso em: 11/03/2022.

IPCC. **Regional fact sheet – Central and South America**. Sixth assessment report. 2021. Disponível em:< https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/factsheets/IPCC_AR6_WGI_Regional_Fact_Sheet_Central_and_South_America.pdf >. Acesso em: 15/03/2022.

KICH, E. M.; MELATI, M. D.; MARCUZZO, F. F. N. **Estudo do regime hídrico pluvial e fluvial na sub-bacia 86 visando a determinação do seu ano hidrológico**. In: XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2015. Brasília. Disponível: <https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/15060?mode=full>. Acesso em: 10/04/2022.

LIEBMANN B.; ALLURED, D. **Daily precipitation grids for South America**. Bull. American Meteorological Society, v.86, n.11, p.1567-1570, 2005. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/26221377>. Acesso em: 21/01/2022.

MARCIANO, A. G.; BARBOSA, A. A.; SILVA, A. P. M. **Cálculo de precipitação média utilizando método de Thiessen e as linhas de cumeada**. Revista Ambiente e Água, 2017. DOI: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1906>.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; BESERRA, E. A.; LACERDA, F.F. **Variabilidade e mudanças climáticas no semiárido brasileiro**, 2011. Disponível em: <http://plutao.sid.inpe.br/J8LNKAN8RW/39RQ7U8?languagebutton=en>. Acesso em: 02/12/2021.

MARENGO, J. A., BERNASCONI, M. **Regional differences in aridity/drought conditions over Northeast Brazil: present state and future projections**. Climatic Change, v.129, p.103-115, 2015. DOI: 10.1007/s10584-014-1310-1.

MATALLO JUNIOR., H. **A desertificação no mundo e no Brasil**. Brasília: UNESCO, 2003.

MELLO, C. R.; VIOLA, M. R. **Mapeamento de chuvas intensas no Estado de Minas Gerais**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.37, n.1, p.37-44, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000100004>.

MENDES, L. A.; SOUZA, T. P. **PR-ET Mobile**. Titular: Universidade Federal de Sergipe. BR512023001843-0. Depósito: 27 jun. 2023. Concessão: 04 jul. 2023.

NAGUETTINI, M.; PINTO, E. J. A. **Hidrologia Estatística**. Belo Horizonte. Serviço Geológico do Brasil (CPRM). 2007.

PENEREIRO, J. C.; MACCHERI, N. A.; BADINGER, A. **Análises da insolação sobre a temperatura média e a precipitação pluvial em cidades brasileiras por meio de tendências em séries anuais**. Revista Geográfica Acadêmica, v.11, n.2, 2017.

NETO, P. J. S.; GARCIA, V. C. **Integração e Entrega Contínua para aplicações móveis desenvolvidas em React Native**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Sistemas de Informação) - Universidade Federal de Pernambuco, UFPE. Recife. 2018.

PAULINO, V.E.N. **Análise de tendência da evapotranspiração e de suas variáveis climatológicas intervenientes no estado do Ceará-BR**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Recursos Hídricos) – Universidade Federal do Ceará, UFC. Fortaleza. 2016.

PELLICONE, G.; CALOIERO, T.; MODICA, G.; GUAGLIARDI, I. **Application of several spatial interpolation techniques to monthly rainfall data in the Calabria region (southern Italy)**. International Journal of Climatology, v.39, p.3651-3666, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.5525>.

PETTITT, A. N. **A non-parametric approach to the change-point problem**. Journal of the Royal Statistical Society, v. 28, n. 2, p. 126-135, 1979. DOI: <https://doi.org/10.2307/2346729>.

PRAKASH, S.; MOMIN, I. M.; RAJAGOPAL, E. N.; BASU, S.; COLLINS, M.; TURNER, A. G.; RAO, K. A.; ASHOK, K. **Seasonal intercomparison of observational rainfall datasets over India during the southwest monsoon season**. International Journal of Climatology, v.35, p.2326-2338, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.4129>.

QGIS. **Interpolation Surface in QGIS Saptial Analysis**. 2014. Disponível em: <https://docs.qgis.org/2.2/en/docs/gentle_gis_introduction/spatial_analysis_interpolation.html> Acesso em: 17/03/2022.

RAMOS, O. E. J. O.; MEDEIROS, E.S.; SILVA, A. Q.; OLIVEIRA, L. A.; BICALHO, C. C. **Estudo do comportamento mensal das chuvas no Município de Aracaju, Estado do Sergipe, Brasil**. Research, Society and Development, v.9, n.8, 2020. DOI: 10.33448/rsd-v9i8.6188.

RIBEIRO, M. E. **Análise de estacionariedade de séries hidrológicas na bacia afluente à usina Castro Alves, RS**. Caxias do Sul. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade de Caxias do Sul, UCS. Caxias do Sul. 2019.

RIBEIRO., M. E; BERTOLIN, T. A.; MENDES, L. A.; RITA, L. C. S. S. **Análises de séries hidrológicas na bacia hidrográfica afluente à usina hidrelétrica Castro Alves, RS**. Revista Brasileira de Geografia Física, v.14, n.4, p.2042-2058, 2021. DOI: 10.26848/rbgf.v14.4.p2042-2058.

RICHTER, A.; WAI NG, K. T.; KARIMI, N. **The role of compactness distribution on the development of regionalized waste management systems**. Journal of Cleaner Production, v.296, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126594>.

ROCHA JÚNIOR, R. L.; SILVA, F. D. S.; COSTA, R. L.; GOMES, H. B.; GOMES, H. B.; SILVA, M. C. L.; PINTO, D. D. C.; HERDIES, D. L.; JÚNIOR, J. B. C.; DIAZ, O. P. **Mudança de Longo Prazo e Regionalização da Evapotranspiração de Referência no Nordeste brasileiro**. Revista Brasileira de Meteorologia, v.35, p.891-902, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-77863550126>.

RODRIGUES, T.M.F.R.; SENNA, M. C. A.; CATALDI, M. **Simulação dos impactos climáticos da desertificação do nordeste brasileiro**. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 24, n.5, p.1037-1047, 2019. DOI: 10.1590/S1413-41522019164751.

SANTOS, E. F. N. **Análise estatística multivariada da precipitação do estado de Sergipe através dos fatores e agrupamentos**. Revista Brasileira de Climatologia, v.23, p.205-222, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v23i0.58267>.

SANTOS, V. O. **Identificação e análise de tendências das variáveis hidrológicas e mudanças no uso e ocupação das terras no alto curso da bacia hidrográfica do rio Uberaba, em Minas Gerais**. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Uberlândia, UFU. Uberlândia. 2016.

SANTOS, A. P. P.; ARAGÃO, M. R. S.; CORREIA, M. F.; SANTOS, S. R. Q.; SILVA, F. D. S.; ARAÚJO, H. A. **Precipitação na Cidade de Salvador: Variabilidade Temporal e Classificação em Quantis**. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 31, n.4, p.454-467, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-778631231420150048>.

SANTOS, F. A.; AQUINO, C. M. S. **Análise da precipitação pluviométrica no município de Castelo do Piauí, Nordeste do Brasil**. Geosp - Espaço e Tempo (Online), v.21, n.2, p. 619-633, 2017. DOI: 10.11606/issn.2179-0892.geosp.2017.123154.

SERGIPE. Defesa Civil de Sergipe. **Plano Estadual de Proteção e Defesa Civil**. 2021. Disponível em: < <https://www.defesacivil.se.gov.br/wp-content/uploads/2021/01/PLANO-DEFESA-CIVIL-2021.pdf> >. Acesso em: 15/03/2021.

SILVA, F. D. S.; COSTA, R. L.; ANTONIO, M. A. V.; AFONSO, E. O.; SANTOS, D. M. S.; MATEUS, N. P. A.; ANTONIO, J. F. **Tendências observadas da evapotranspiração potencial no estado de Alagoas (1961-2016)**. Revista Brasileira de Geografia Física, v.11, n.1, p.28-43, 2018. DOI: 10.26848/rbgf.v10.6.p028-043.

SILVA, P. E.; SILVA, C. M. S.; SPYRIDES, M. H. C.; ANDRADE, L. M. B. **Análise de Índices de Extremos Climáticos no Nordeste e Amazônia Brasileira para o Período entre 1980 a 2013**. Anuário do Instituto de Geociências, v.42, p.137-148, 2019. DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2019_2_137_148.

SILVA, L. R. S. **Monitoramento hidrometeorológico no Brasil: uma análise sob a ótica da coordenação de políticas públicas**. Revista de Gestão de Água da América Latina, v.18, 2021. DOI: <https://doi.org/10.21168/reg.v18e3>.

SILVA, J.T.; GRILO JUNIOR, J.A.S.; AZEVEDO, P.V. **Balço hídrico-climático e classificação climática para a cidade de São Paulo do Potengi-RN**. In: I Workshop Internacional Sobre Água no Semiárido Brasileiro. Paraíba. 2013. Disponível em: <https://editorarealize.com.br/artigo/visualizar/4979>. Acesso em: 10/03/2022.

SOUZA, T. P.; MACÊDO, A. P. B. A.; FERNANDES, M.R.M.; ROCHA, J.C.S.; SOUZA, R. G. **Redes de monitoramento pluviométrico e meteorológico do estado de sergipe: levantamento e resgate histórico**. In: XIII Encontro de Recursos Hídricos em Sergipe, 2021a. Aracaju. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=6597>. Acesso em: 18/01/2022.

SOUZA, T. P.; MACÊDO, A. P. B. A.; FERNANDES, M.R.M.; ROCHA, J.C.S.; SOUZA, R. G. **Avaliação da rede monitoramento pluviométrico da bacia hidrográfica do Rio Sergipe**. In: XIII Encontro de Recursos Hídricos em Sergipe, 2021b. Aracaju. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=6594>. Acesso em: 18/01/2022.

SUDENE. **Resolução N° 150 13 de dezembro de 2021**. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-condel/sudene-n-150-de-13-de-dezembro-de-2021-370970623> . Acesso em: 27/03/2023.

SUDENE. **Delimitação Semiárido 2021**. Disponível em: < <https://www.gov.br/sudene/ptbr/centrais-de-conteudo/02semiaridorelatorionv.pdf> >. Acesso em: 27/03/2023.

TAVARES, V.C.; ARRUDA, I.R.P.; SILVA, D.G. **Desertificação, mudanças climáticas e secas no semiárido brasileiro: uma revisão bibliográfica**. Geosul. v.34, n.70, p.385-405, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.5007/2177-5230.2019v34n70p385>.

TIMMERMANN, A; AN, S. I.; KUG, J.; JIN, F...ZHANG. X. **El Niño-Southern Oscillation complexity**. *Nature*, v.559, p.535-545, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0252-6>.

TUCCI, C.E.M.; BRAGA, B. **Clima e Recursos Hídricos no Brasil**. 1 ed. Porto Alegre. ABRH, 2003.

TUCCI, C.E.M. **Modelos Hidrológicos**. 2 ed. Porto Alegre. Editora da UFRGS, 2005.

TUCCI, C.E.M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 4 ed. Porto Alegre. Editora ABRH, 2020.

XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCALON, B. R. **Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013)**. *International Journal of Climatology*, v.36, p. 2644-2659, 2016. DOI: 10.1002/joc.4518.

XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCALON, B. R. **An update of Xavier, King and Scanlon (2016) daily precipitation gridded data set for Brazil**. In: XVIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. 2017.

XAVIER, A. C., SCANLON, B. R., KING, C. W., & ALVES, A. I. **New improved Brazilian daily weather gridded data (1961–2020)**. *International Journal of Climatology*, p.1-15. 2022. DOI: 10.1002/joc.7731.

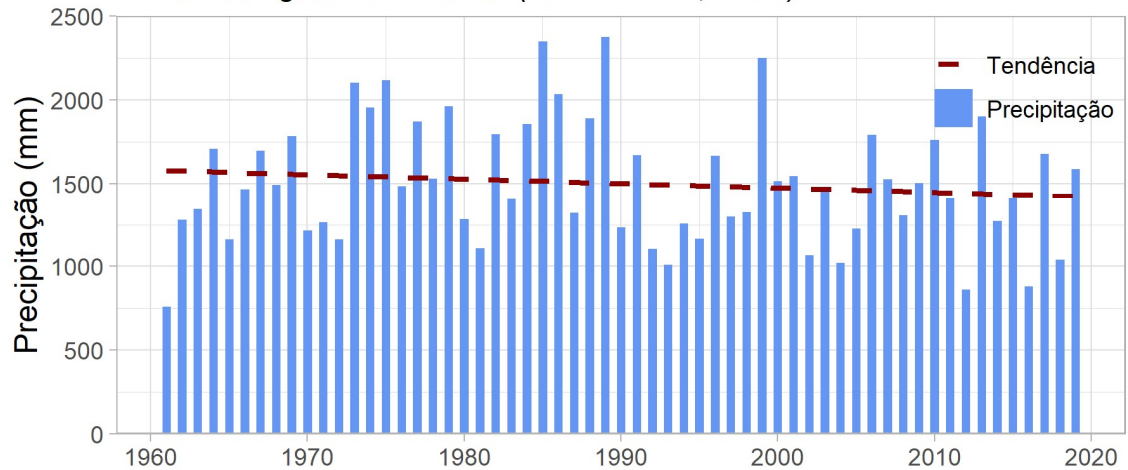
YUE, S., PILON, P., CAVADIAS, G. **Power of the Mann–Kendall and Spearman’s rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series**. *Journal of Hydrology*, v. 259, p.254-271, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00594-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00594-7).

APÊNDICES

Apêndice A – Precipitação anual por bacia hidrográfica.

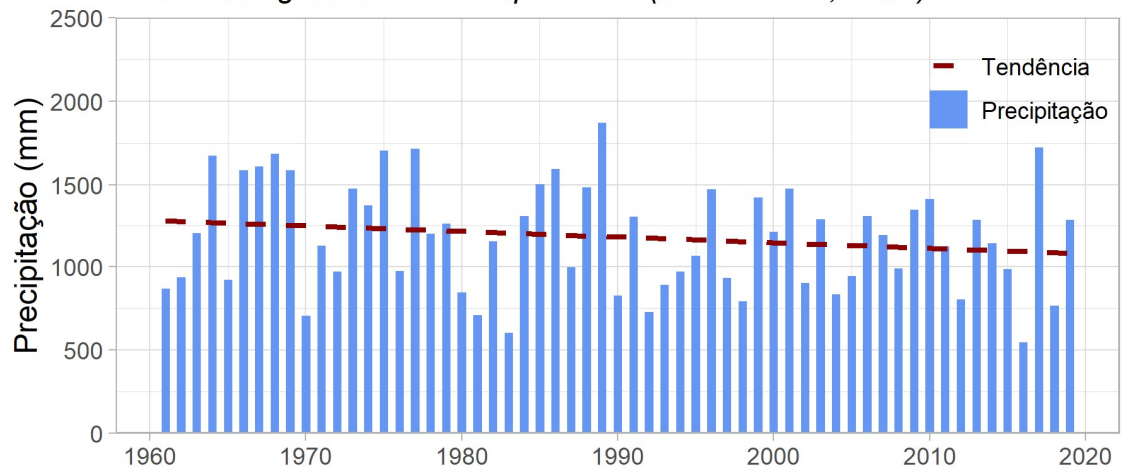
Precipitação Anual

Bacia Hidrográfica do Abaís (MLT = 1499,2 mm)



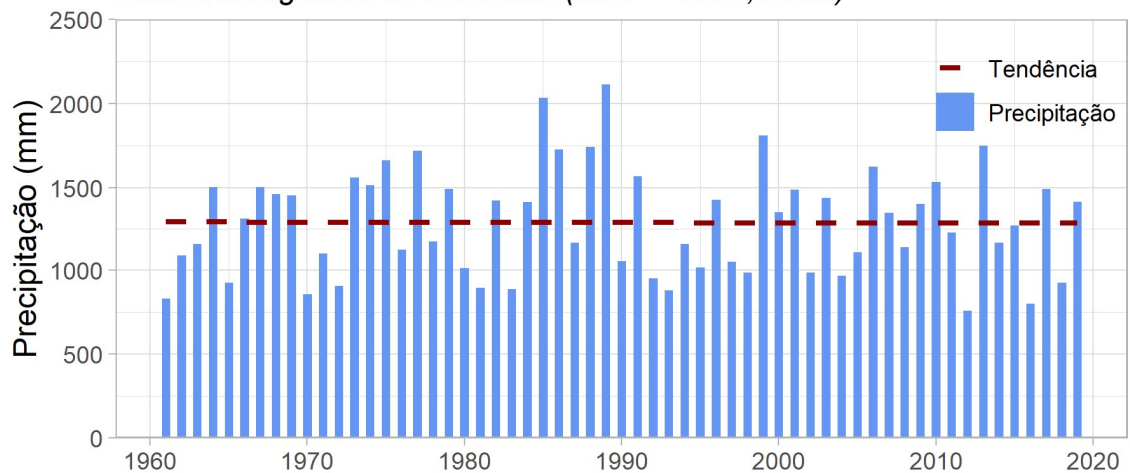
Precipitação Anual

Bacia Hidrográfica do Rio Japarutuba (MLT = 1178,7 mm)



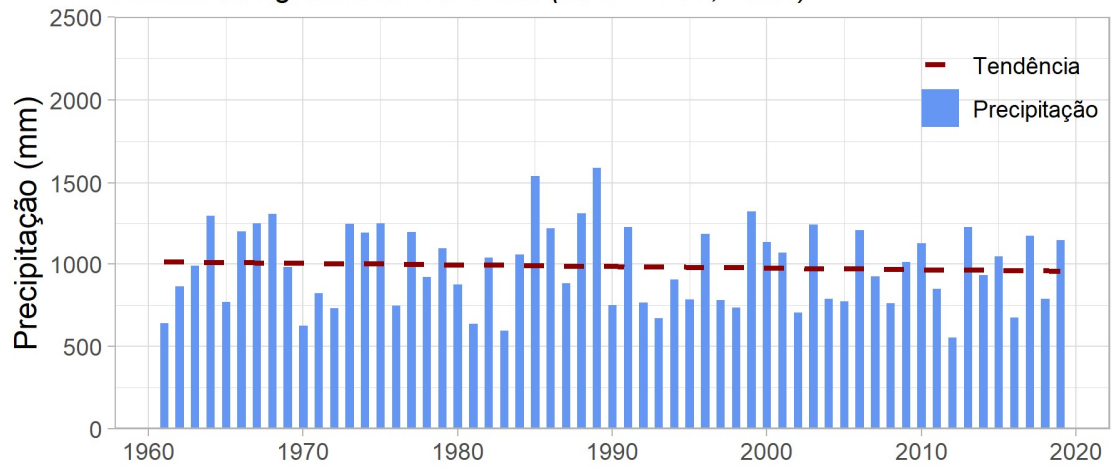
Precipitação Anual

Bacia Hidrográfica do Rio Piauí (MLT = 1285,5 mm)



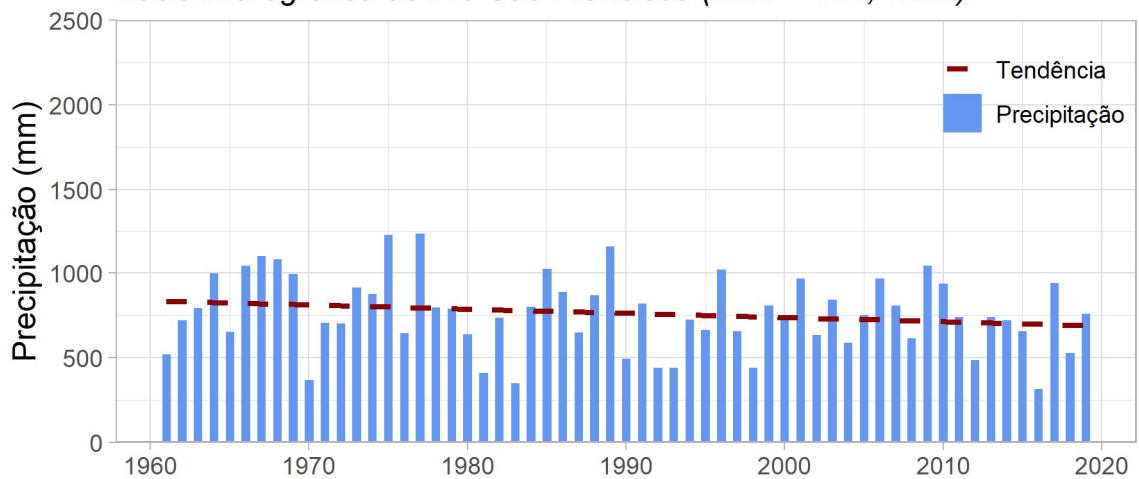
Precipitação Anual

Bacia Hidrográfica do Rio Real (MLT = 988,1 mm)



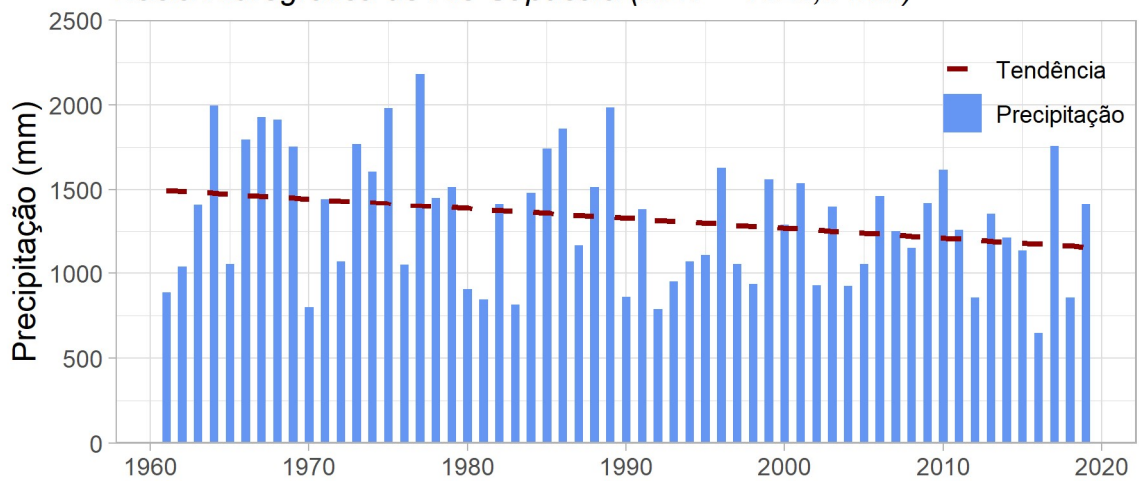
Precipitação Anual

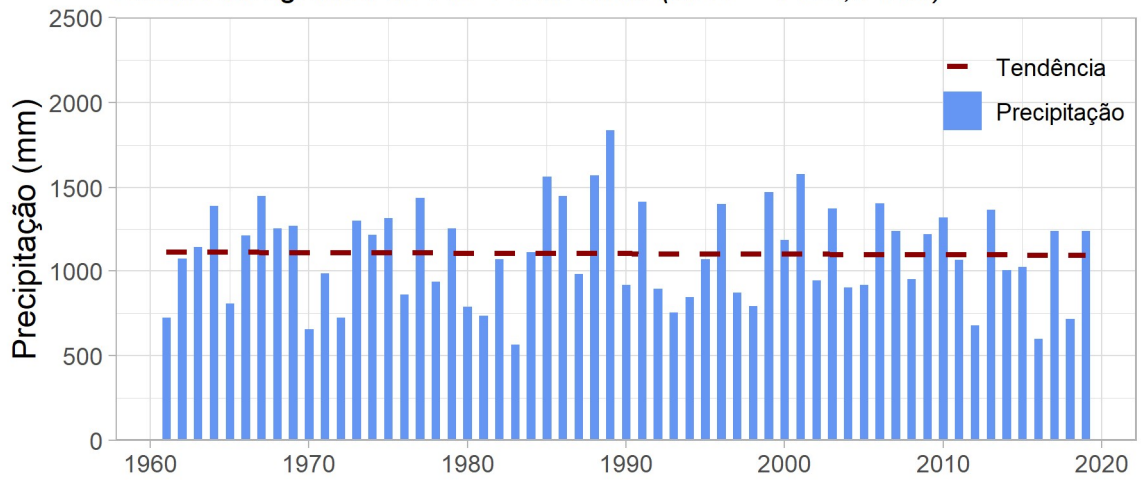
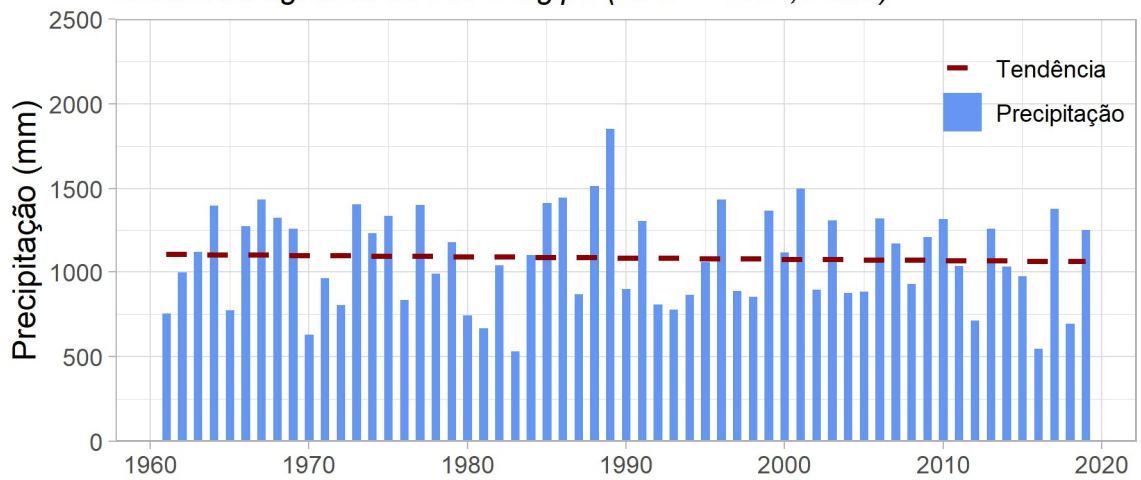
Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (MLT = 763,2 mm)



Precipitação Anual

Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaia (MLT = 1323,9 mm)

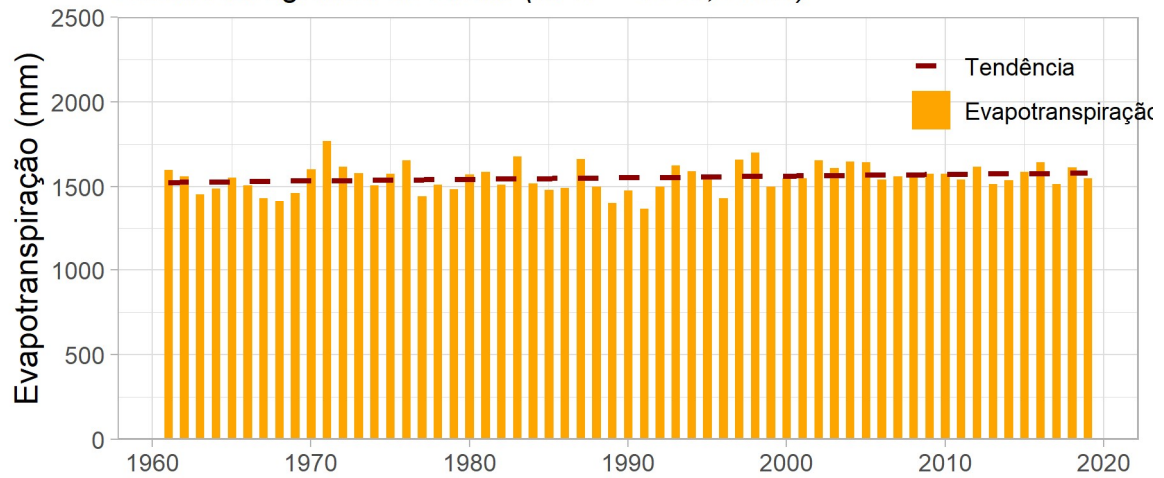


*Precipitação Anual**Bacia Hidrográfica do Rio Vaza Barris (MLT = 1102,9 mm)**Precipitação Anual**Bacia Hidrográfica do Rio Sergipe (MLT = 1082,6 mm)*

Apêndice B – Evapotranspiração anual por bacia hidrográfica.

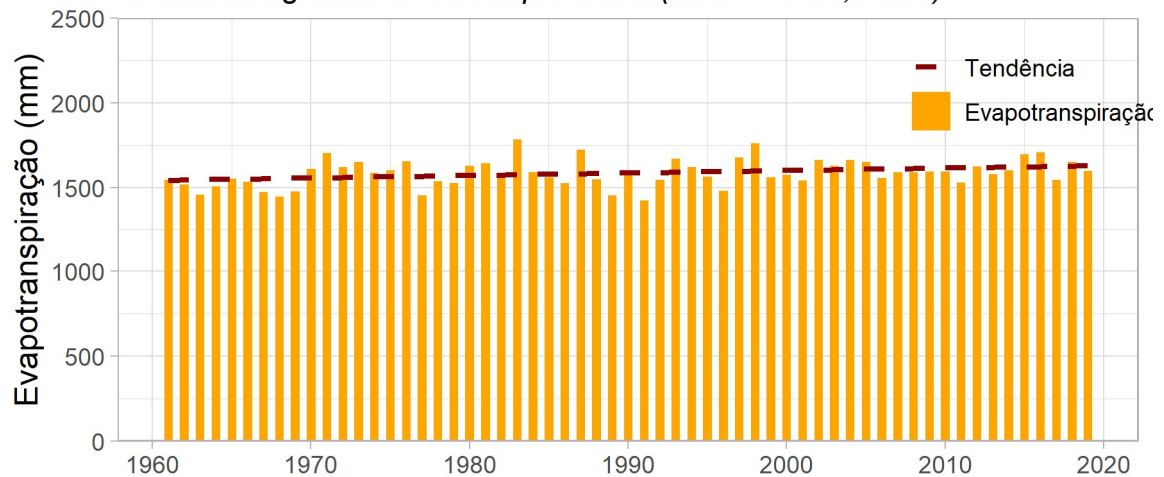
Evapotranspiração Anual

Bacia Hidrográfica do Abaís (MLT = 1550,8 mm)



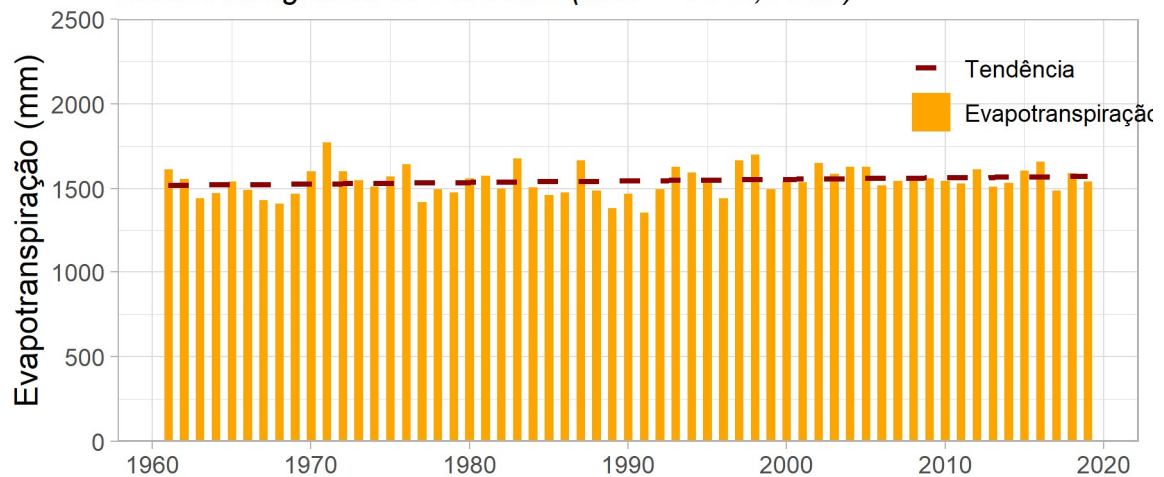
Evapotranspiração Anual

Bacia Hidrográfica do Rio Japarutuba (MLT = 1584,1 mm)



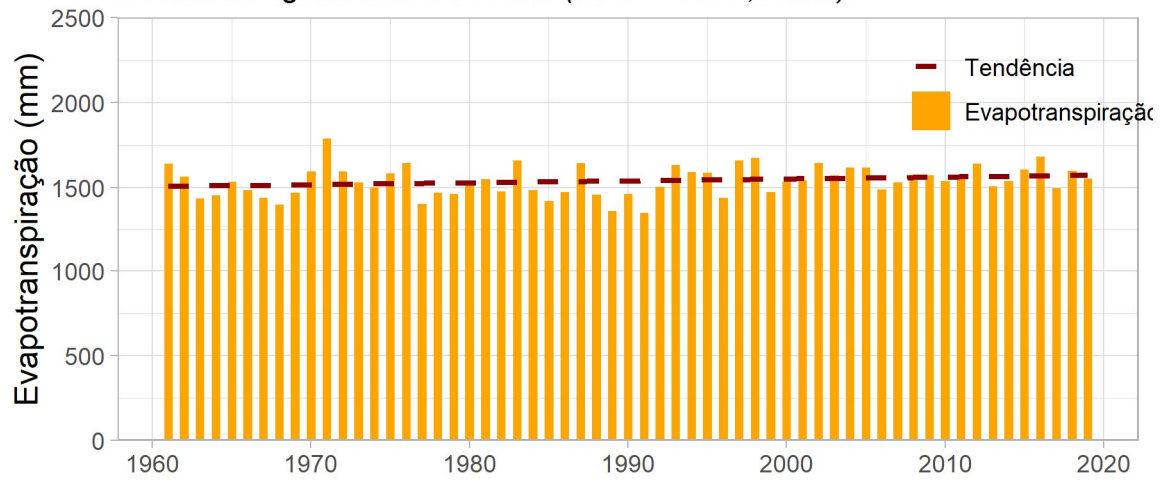
Evapotranspiração Anual

Bacia Hidrográfica do Rio Piauí (MLT = 1543,6 mm)



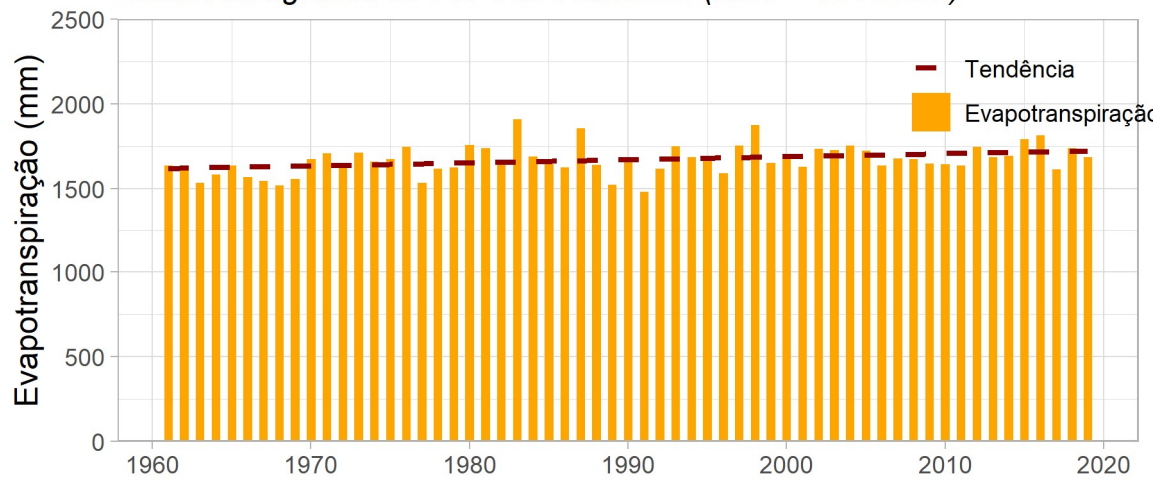
Evapotranspiração Anual

Bacia Hidrográfica do Rio Real (MLT = 1537,6 mm)



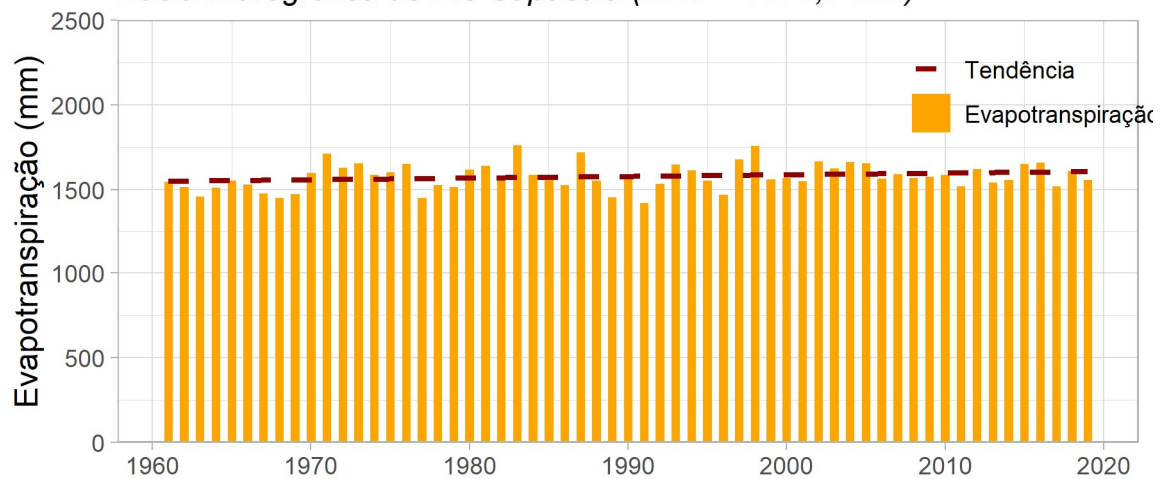
Evapotranspiração Anual

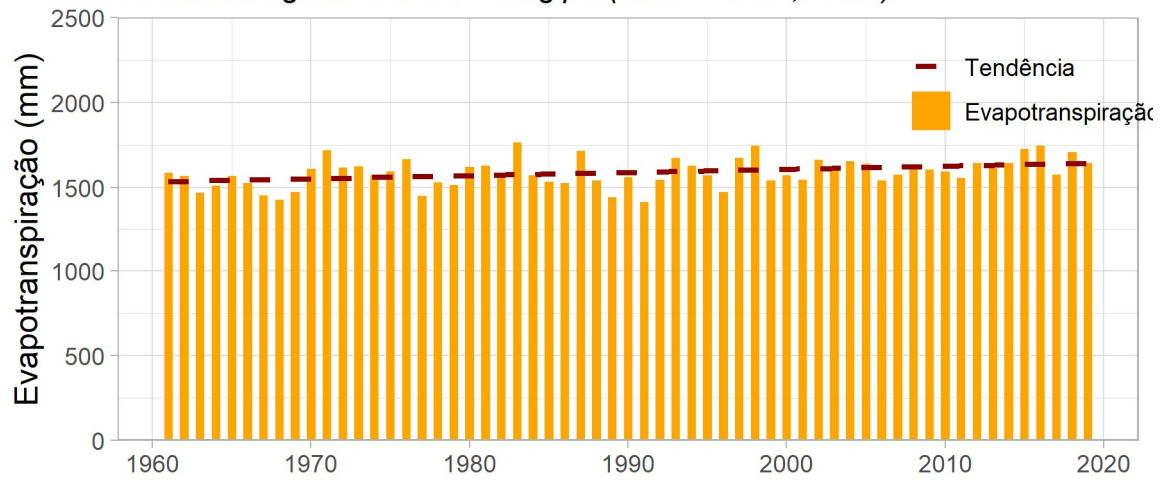
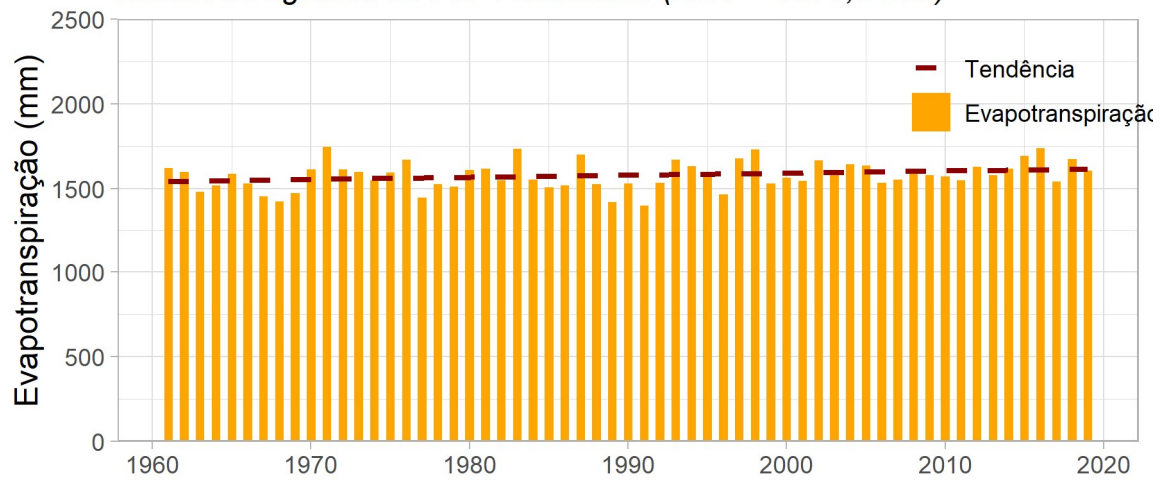
Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (MLT = 1668 mm)



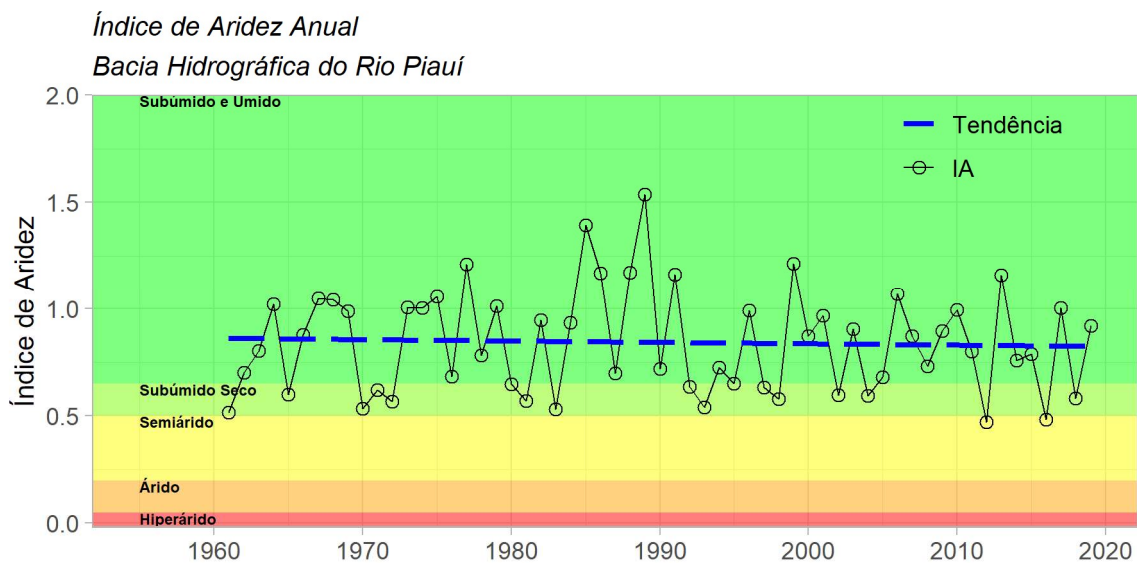
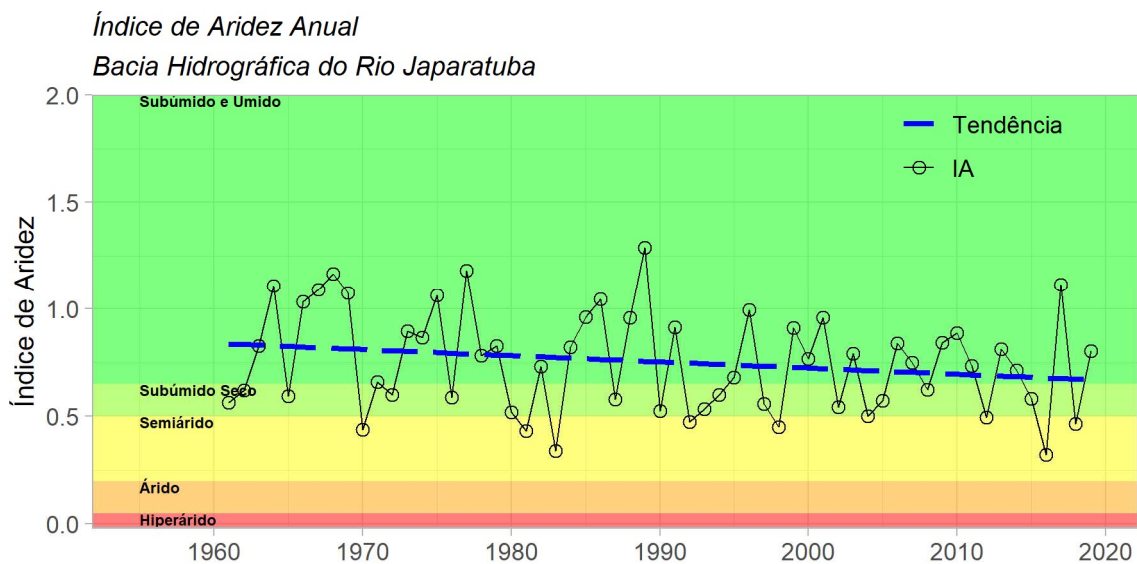
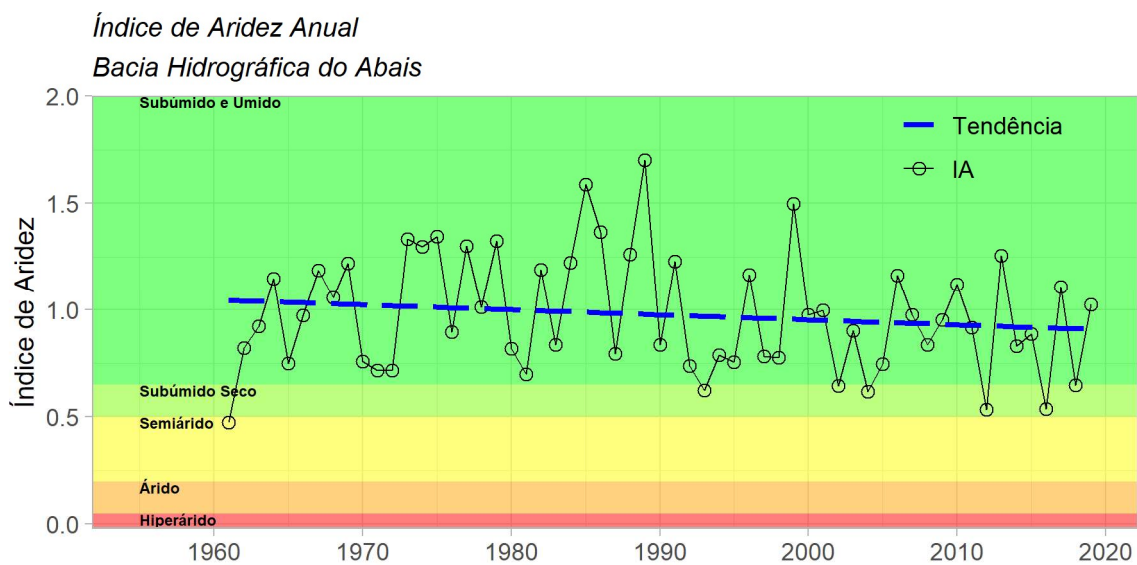
Evapotranspiração Anual

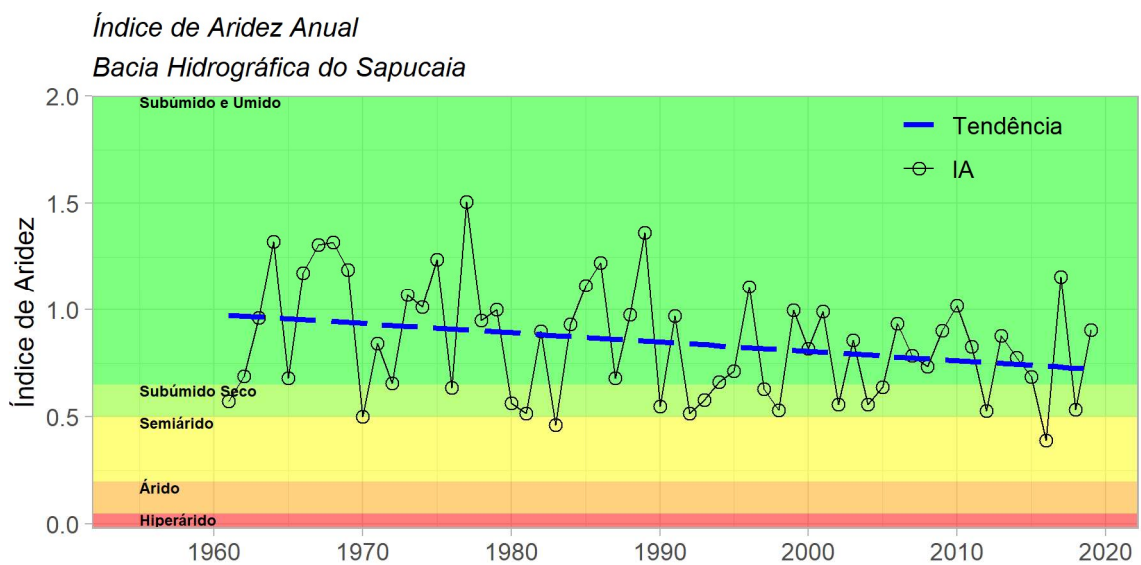
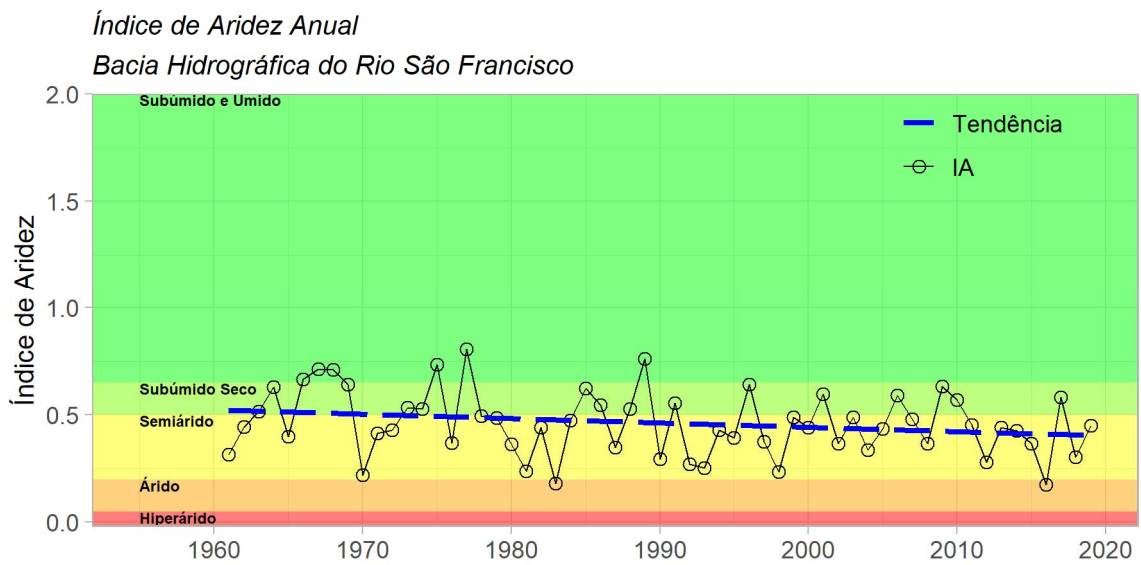
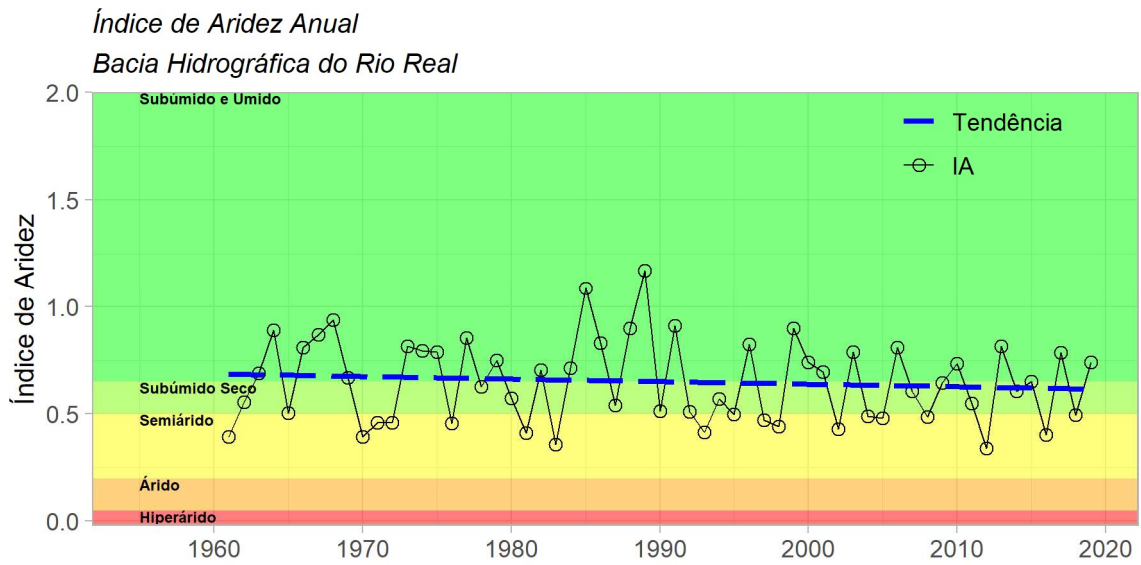
Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaia (MLT = 1575,7 mm)



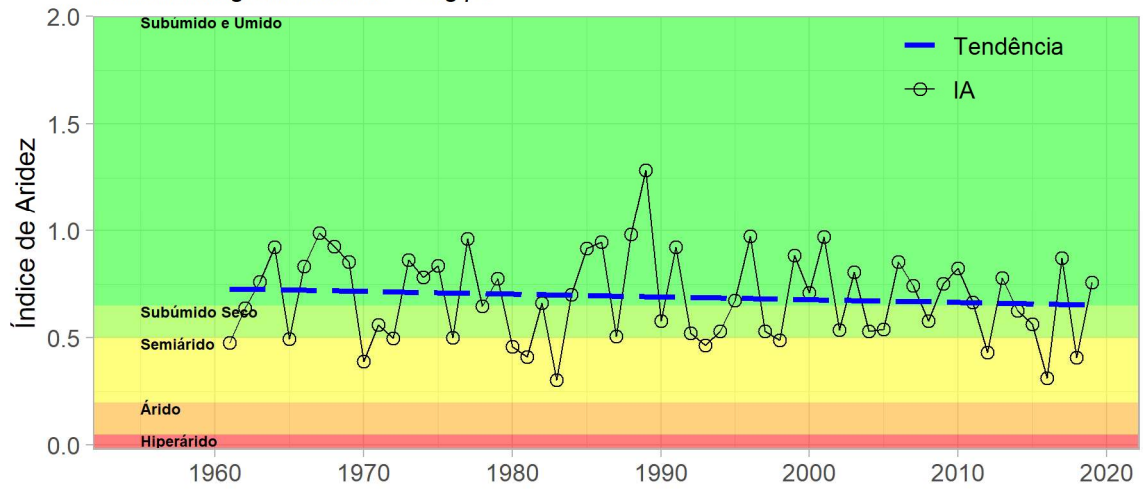
*Evapotranspiração Anual**Bacia Hidrográfica do Rio Sergipe (MLT = 1586,7 mm)**Evapotranspiração Anual**Bacia Hidrográfica do Rio Vaza Barris (MLT = 1577,3 mm)*

Apêndice C – Índice de Aridez anual por bacia hidrográfica.

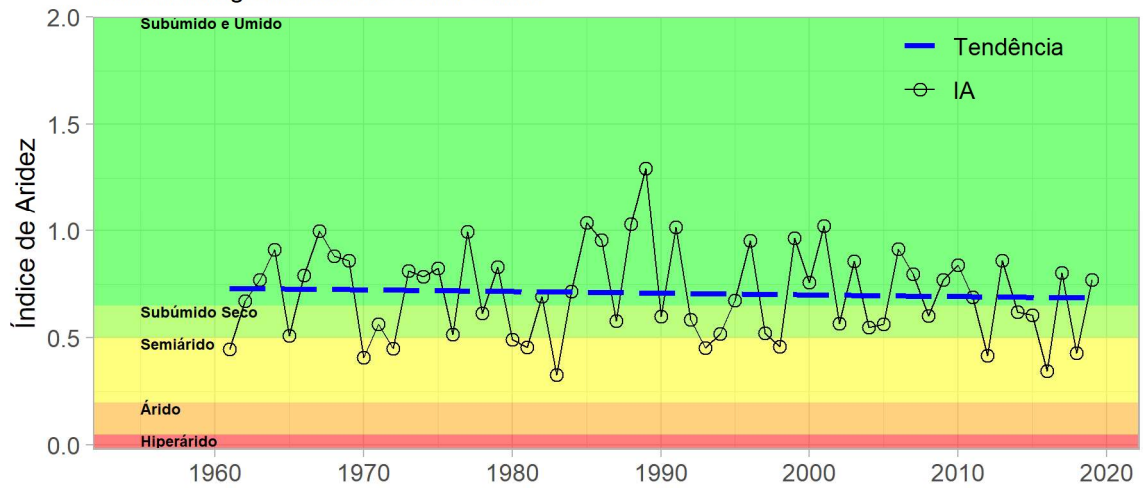




Índice de Aridez Anual
Bacia Hidrográfica do Rio Sergipe



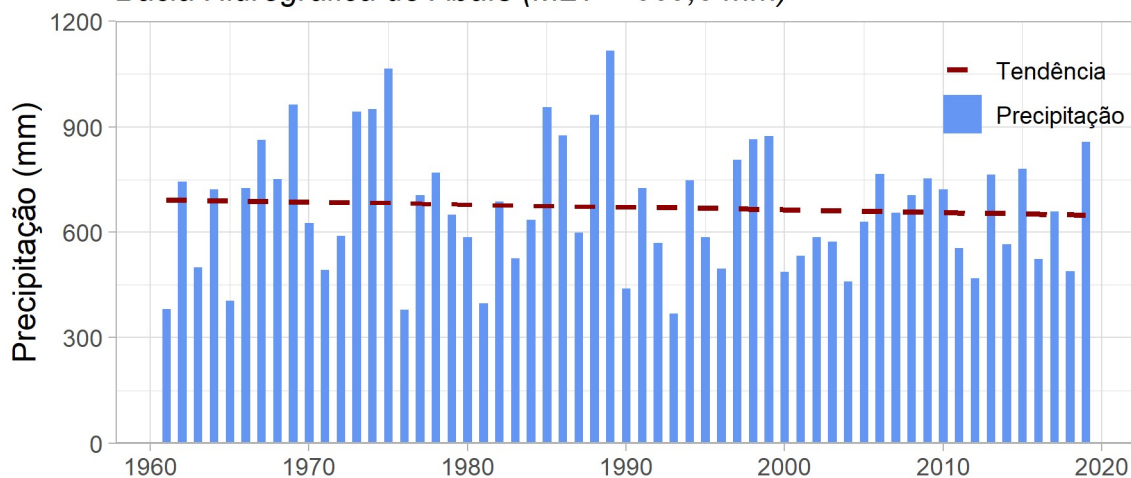
Índice de Aridez Anual
Bacia Hidrográfica do Rio Vaza-Barris



Apêndice D – Chuva do Trimestre Mais Úmido (TMU) por bacia hidrográfica.

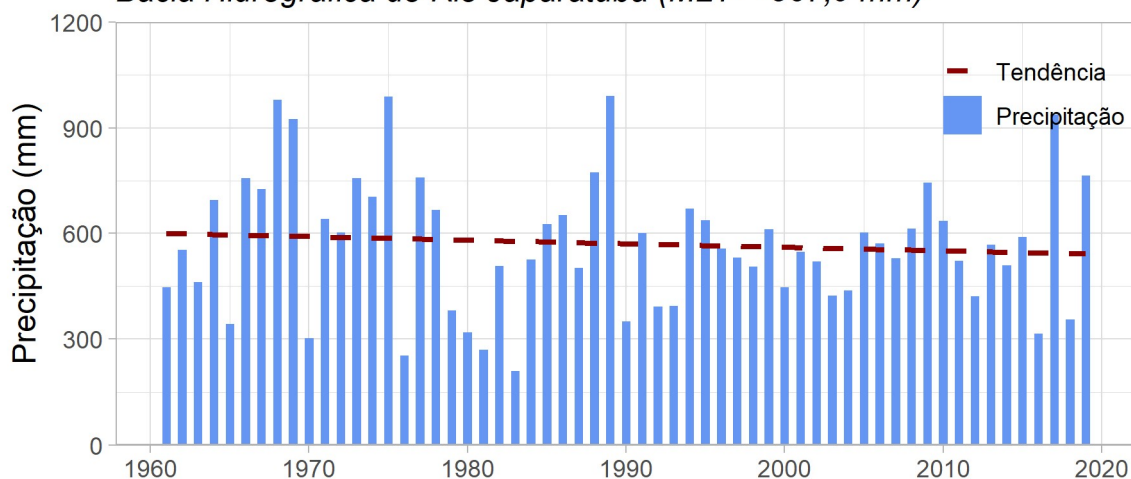
Precipitação Trimestre Mais Úmido (Mai-Jun-Jul)

Bacia Hidrográfica do Abaís (MLT = 669,5 mm)



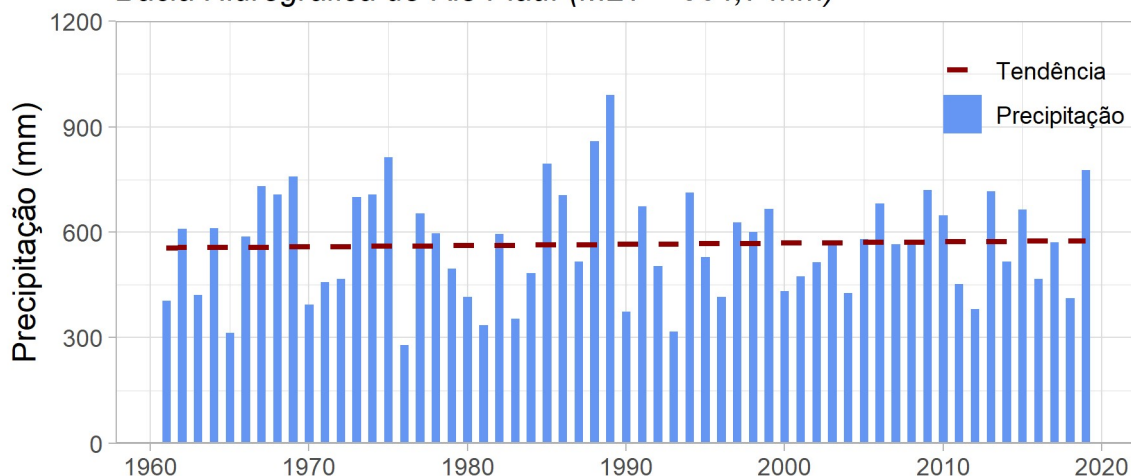
Precipitação Trimestre Mais Úmido (Mai-Jun-Jul)

Bacia Hidrográfica do Rio Japarutuba (MLT = 567,9 mm)

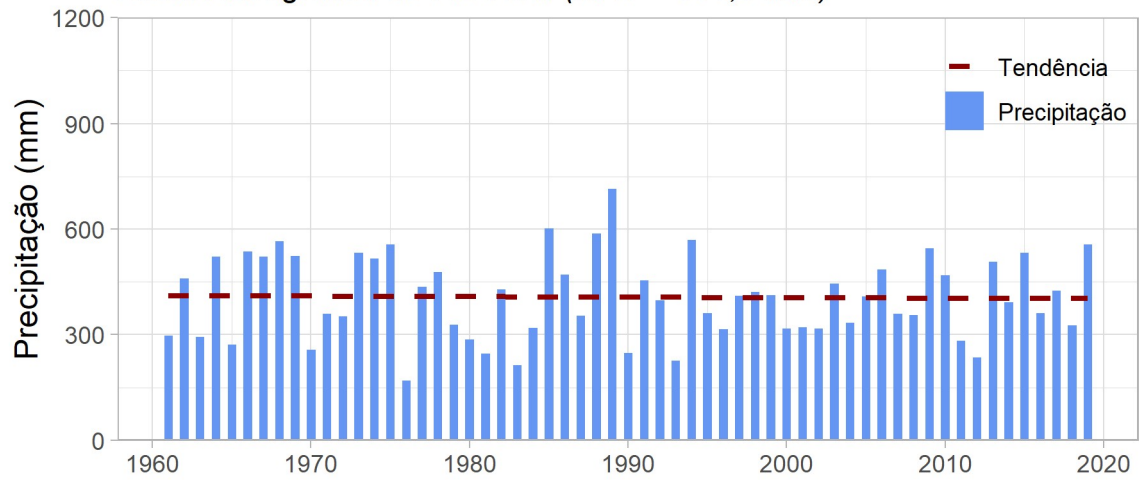


Precipitação Trimestre Mais Úmido (Mai-Jun-Jul)

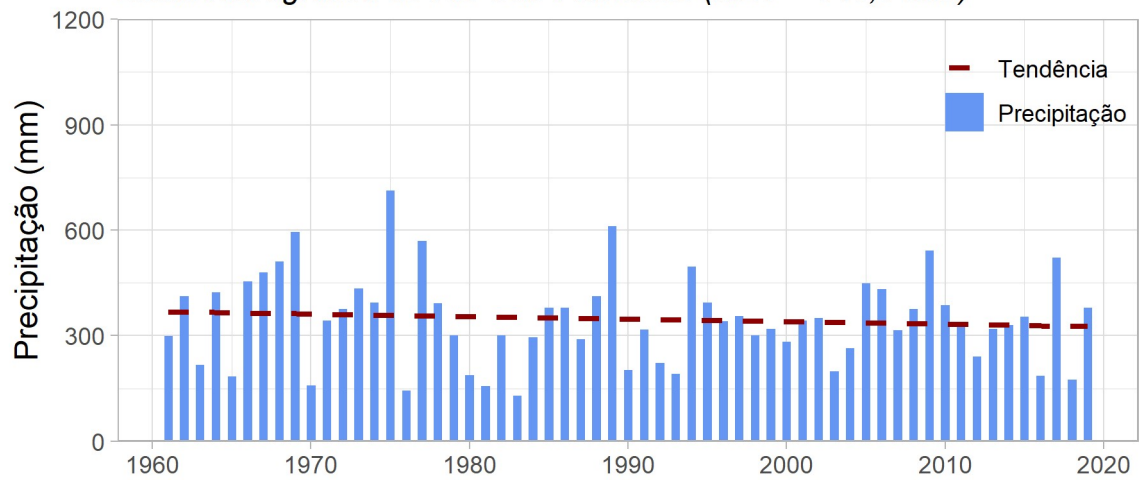
Bacia Hidrográfica do Rio Piauí (MLT = 564,7 mm)



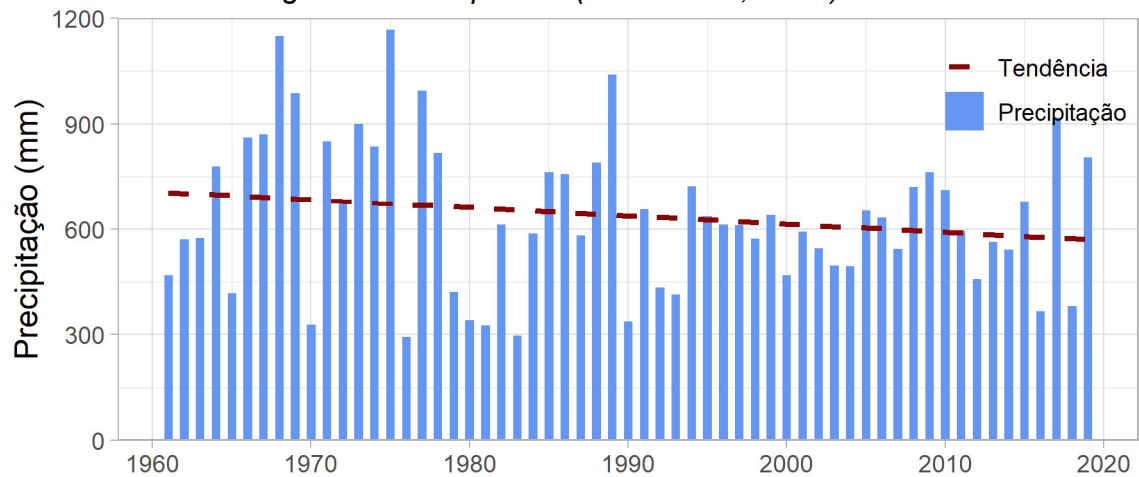
Precipitação Trimestre Mais Úmido (Mai-Jun-Jul)
Bacia Hidrográfica do Rio Real (MLT = 408,1 mm)



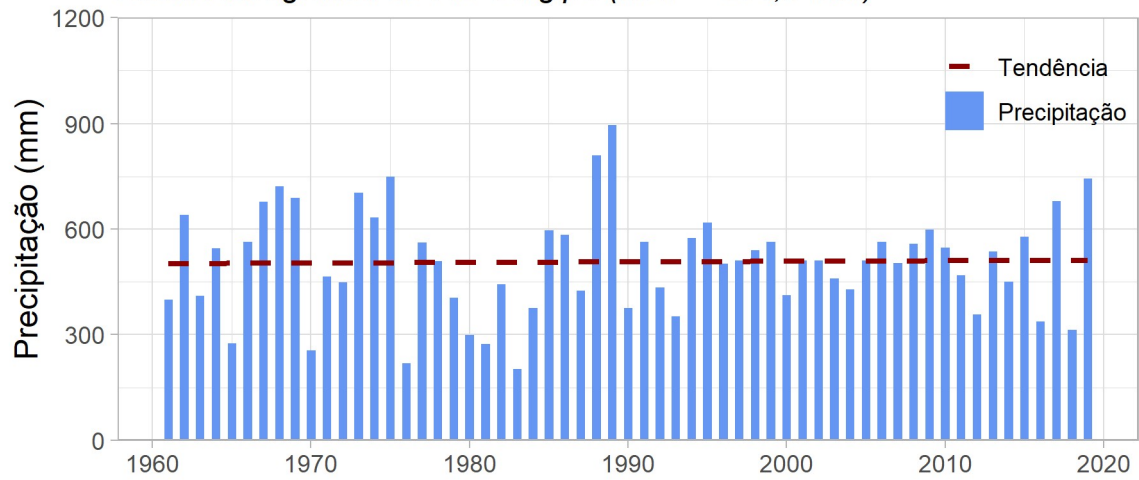
Precipitação Trimestre Mais Úmido (Mai-Jun-Jul)
Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (MLT = 346,9 mm)



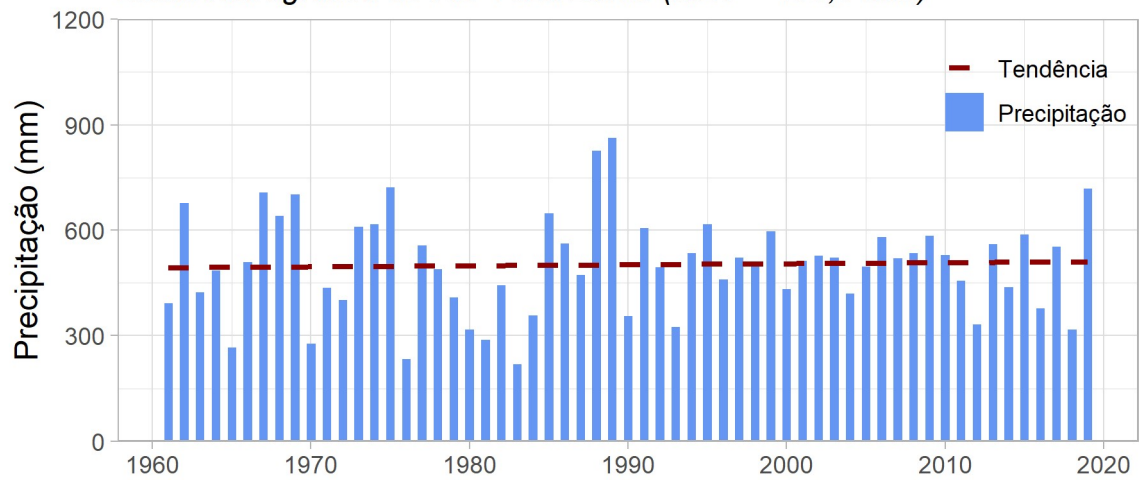
Precipitação Trimestre Mais Úmido (Mai-Jun-Jul)
Bacia Hidrográfica do Sapucaia (MLT = 635,6 mm)



Precipitação Trimestre Mais Úmido (Mai-Jun-Jul)
Bacia Hidrográfica do Rio Sergipe (MLT = 504,9 mm)



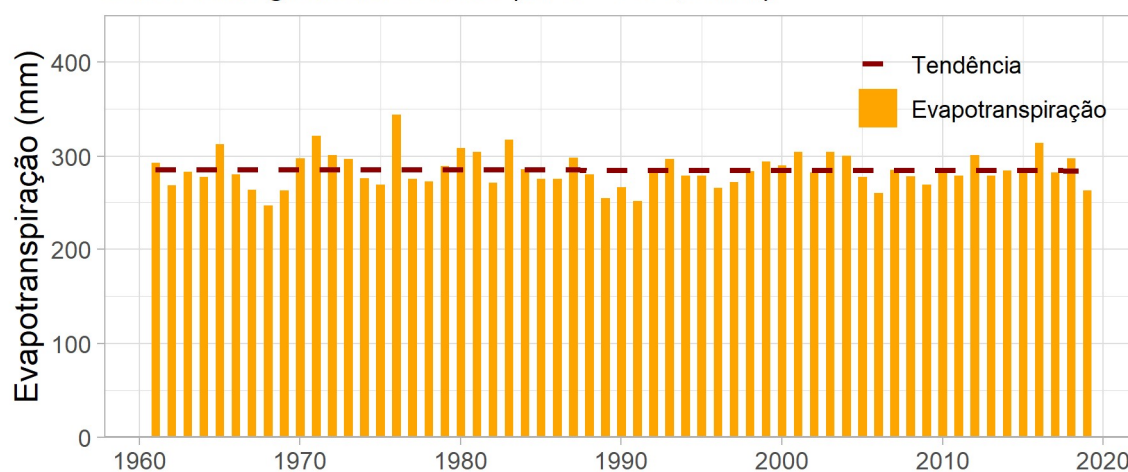
Precipitação Trimestre Mais Úmido (Mai-Jun-Jul)
Bacia Hidrográfica do Rio Vaza Barris (MLT = 499,9 mm)



Apêndice E – Evapotranspiração do Trimestre Mais Úmido (TMU) por bacia.

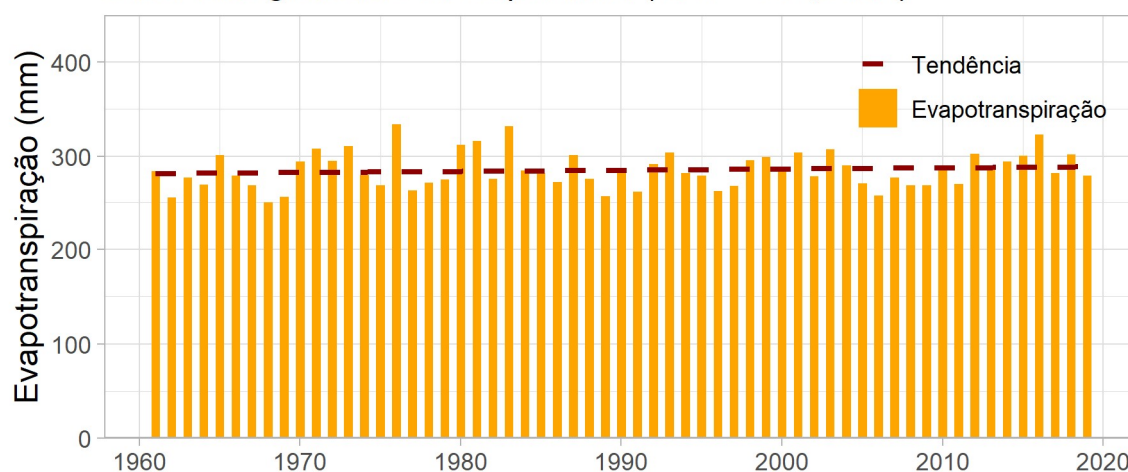
Evapotranspiração do Trimestre Mais Úmido (Mai-Jun-Jul)

Bacia Hidrográfica do Abaís (MLT = 284,8 mm)



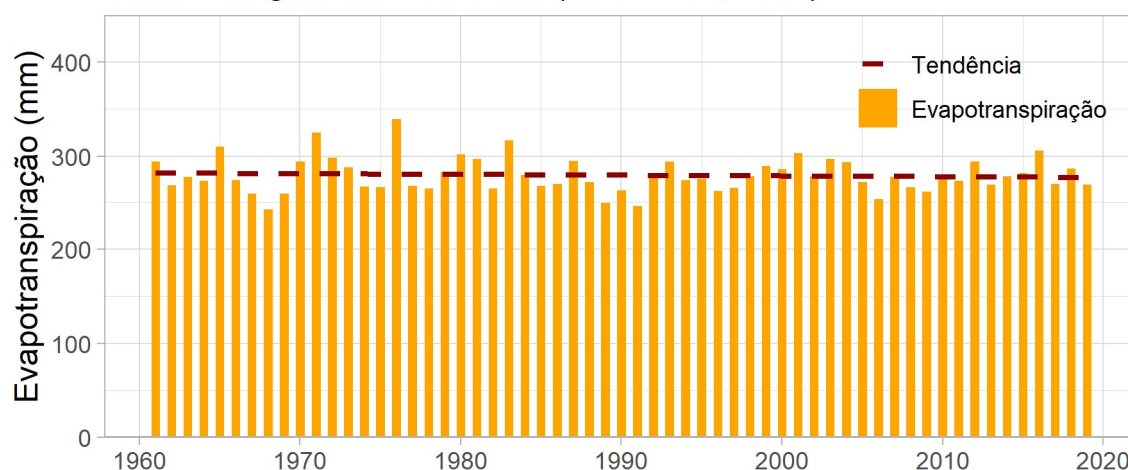
Evapotranspiração do Trimestre Mais Úmido (Mai-Jun-Jul)

Bacia Hidrográfica do Rio Japarutuba (MLT = 284,9 mm)

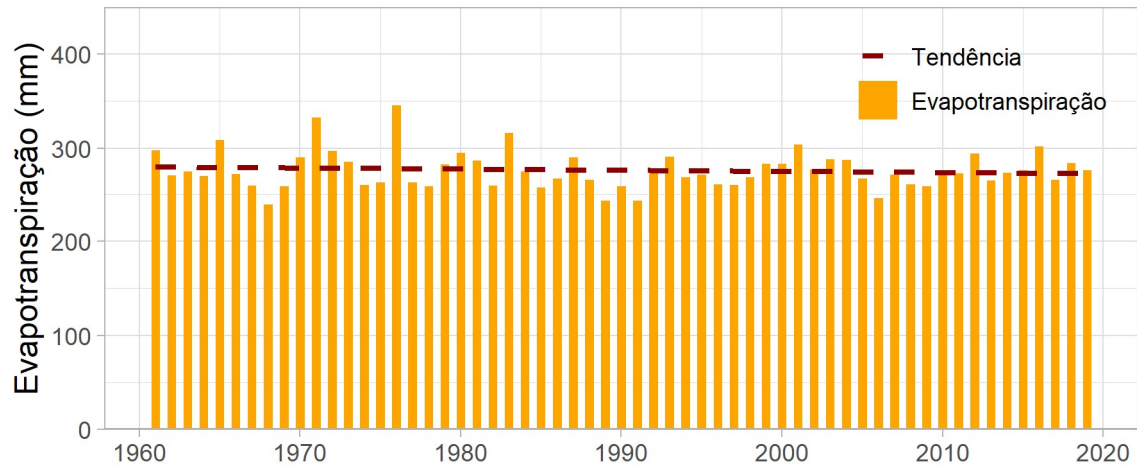


Evapotranspiração do Trimestre Mais Úmido (Mai-Jun-Jul)

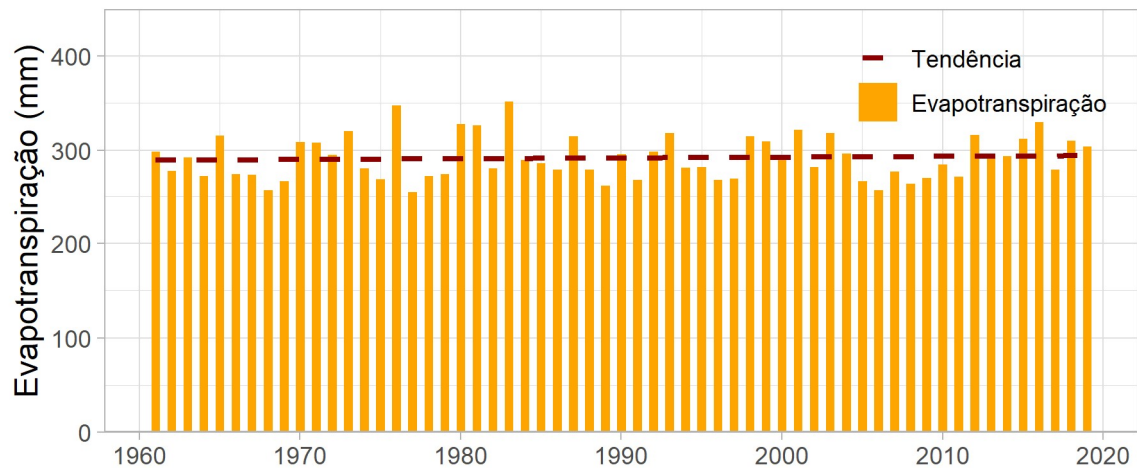
Bacia Hidrográfica do Rio Piauí (MLT = 279,5 mm)



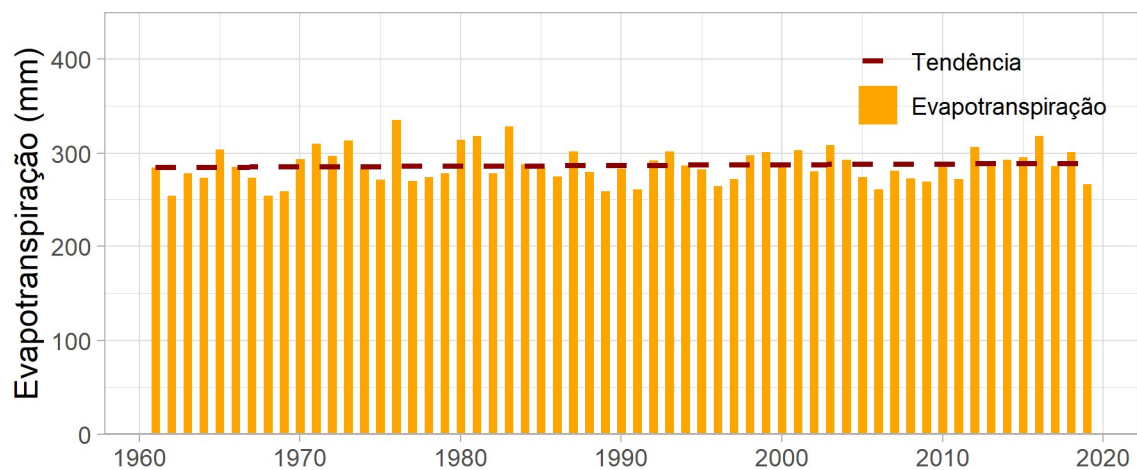
Evapotranspiração do Trimestre Mais Úmido (Mai-Jun-Jul)
Bacia Hidrográfica do Rio Real (MLT = 276,2 mm)



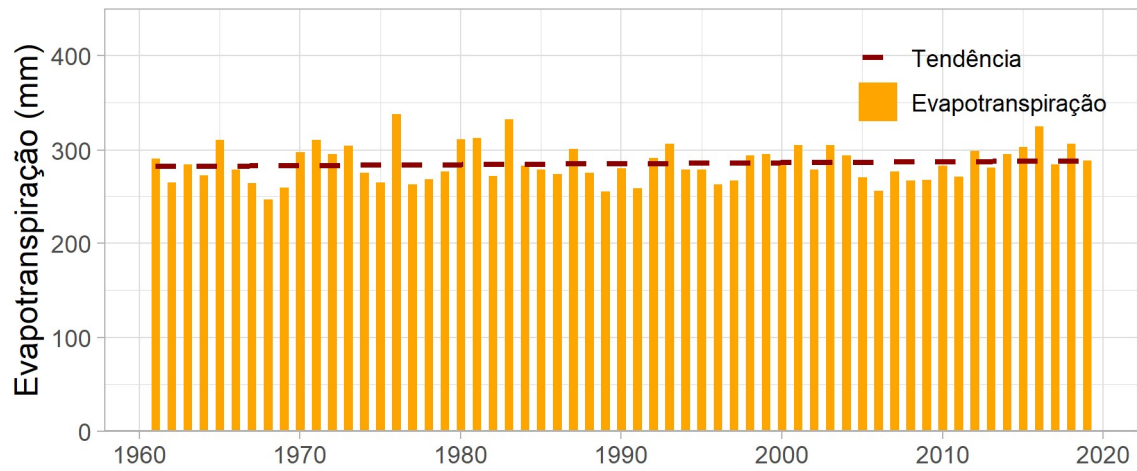
Evapotranspiração do Trimestre Mais Úmido (Mai-Jun-Jul)
Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (MLT = 291,5 mm)



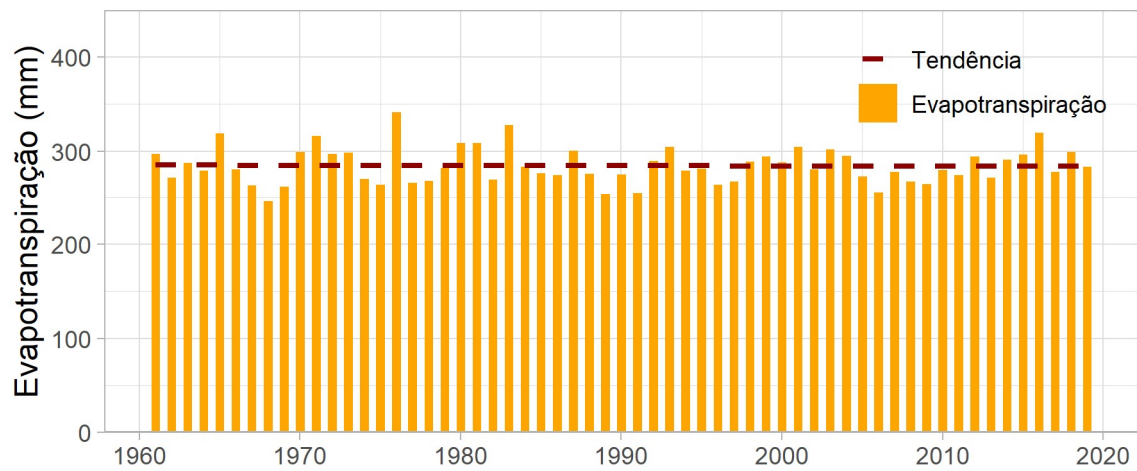
Evapotranspiração do Trimestre Mais Úmido (Mai-Jun-Jul)
Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaia (MLT = 286,7 mm)



Evapotranspiração do Trimestre Mais Úmido (Mai-Jun-Jul)
Bacia Hidrográfica do Rio Sergipe (MLT = 285,4 mm)



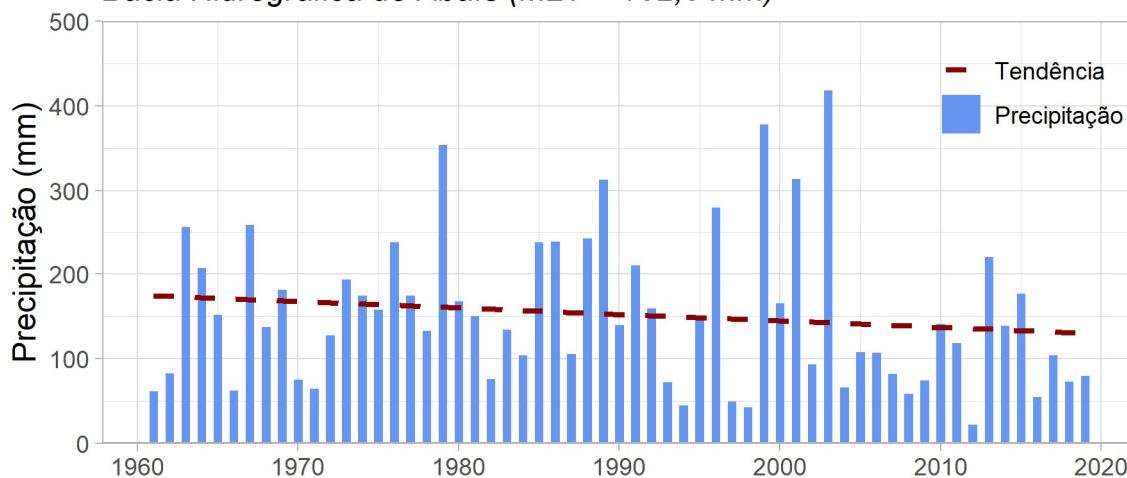
Evapotranspiração do Trimestre Mais Úmido (Mai-Jun-Jul)
Bacia Hidrográfica do Rio Vaza Barris (MLT = 284,4 mm)



Apêndice F – Precipitação do Trimestre Mais Seco (TMS) por bacia.

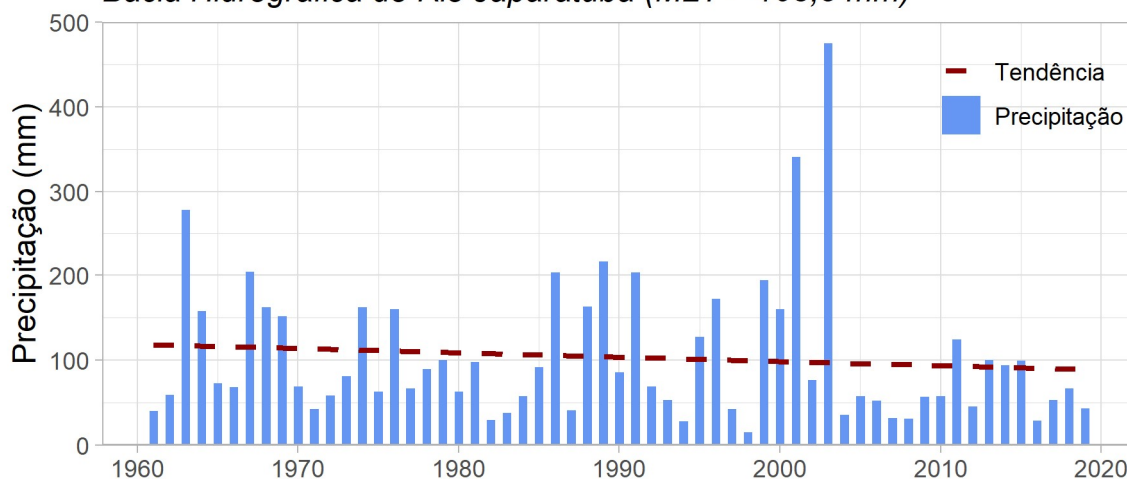
Precipitação Trimestre Mais Seco (Nov-Dez-Jan)

Bacia Hidrográfica do Abaís (MLT = 152,3 mm)



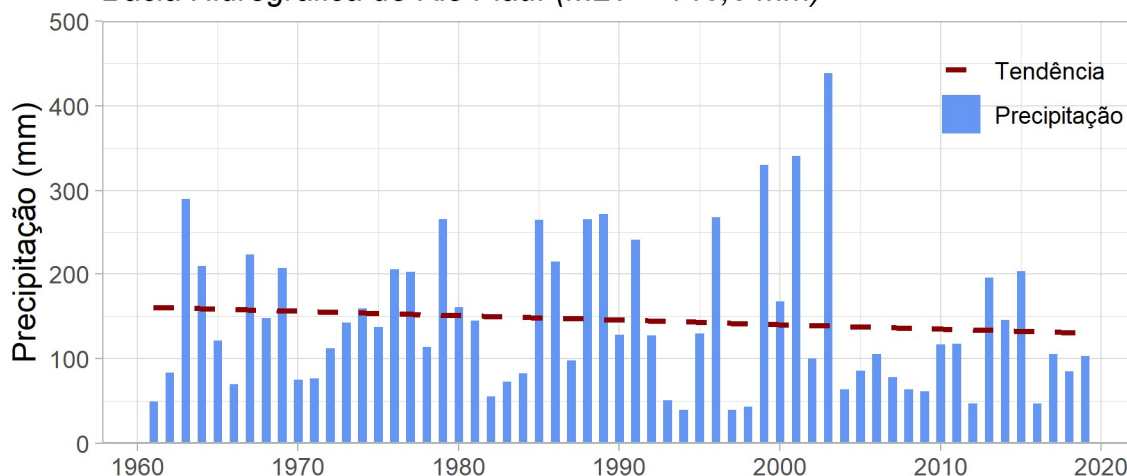
Precipitação Trimestre Mais Seco (Nov-Dez-Jan)

Bacia Hidrográfica do Rio Japarutuba (MLT = 103,5 mm)

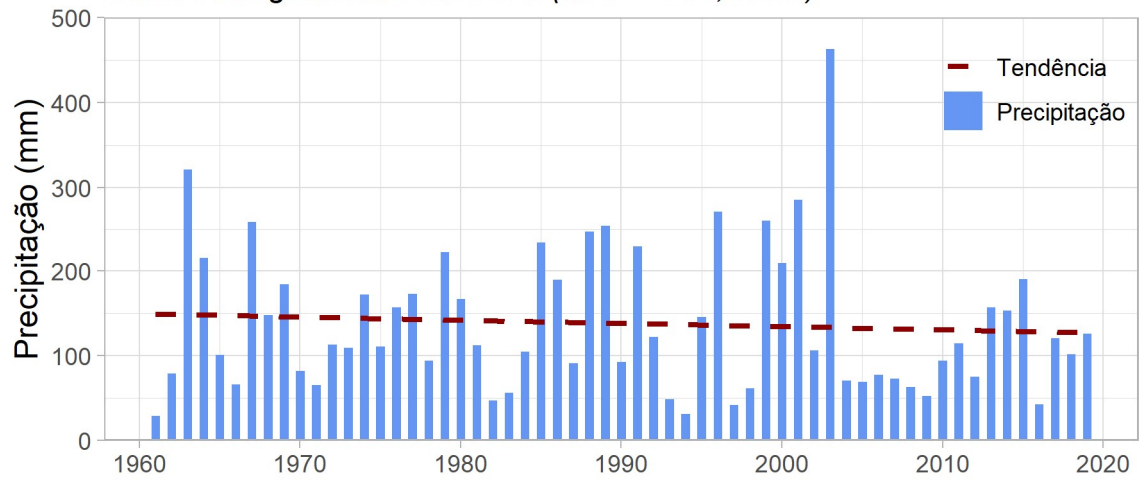


Precipitação Trimestre Mais Seco (Nov-Dez-Jan)

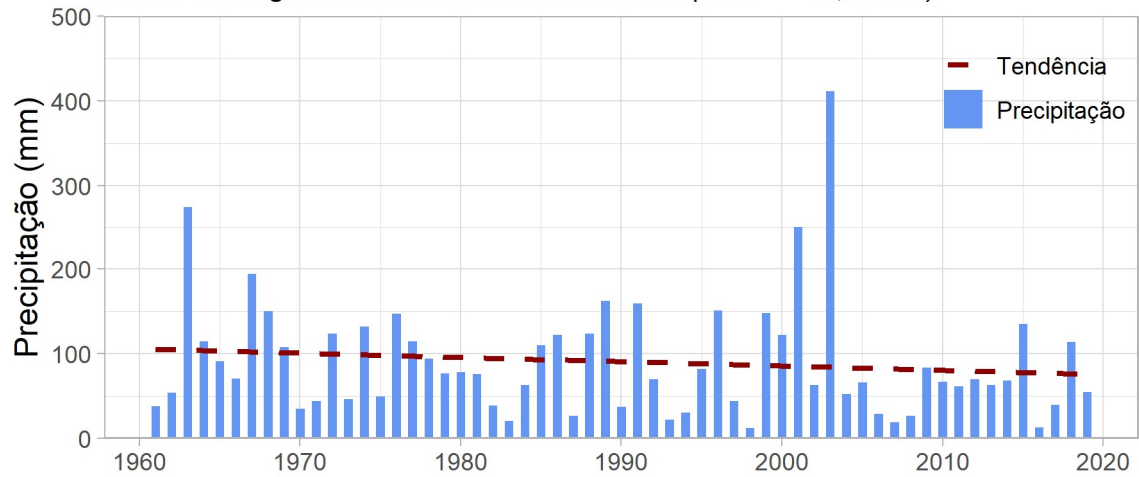
Bacia Hidrográfica do Rio Piauí (MLT = 145,6 mm)



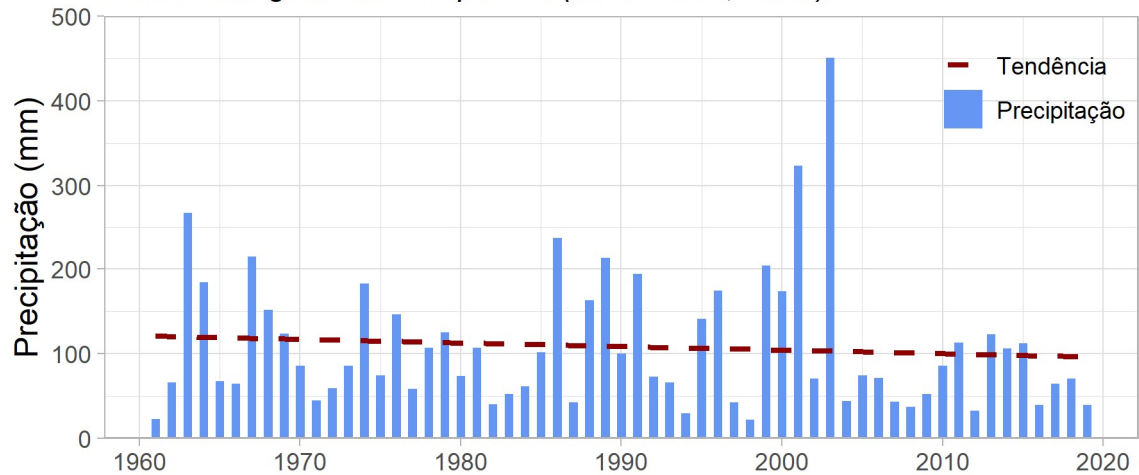
Precipitação Trimestre Mais Seco (Nov-Dez-Jan)
Bacia Hidrográfica do Rio Real (MLT = 138,4 mm)



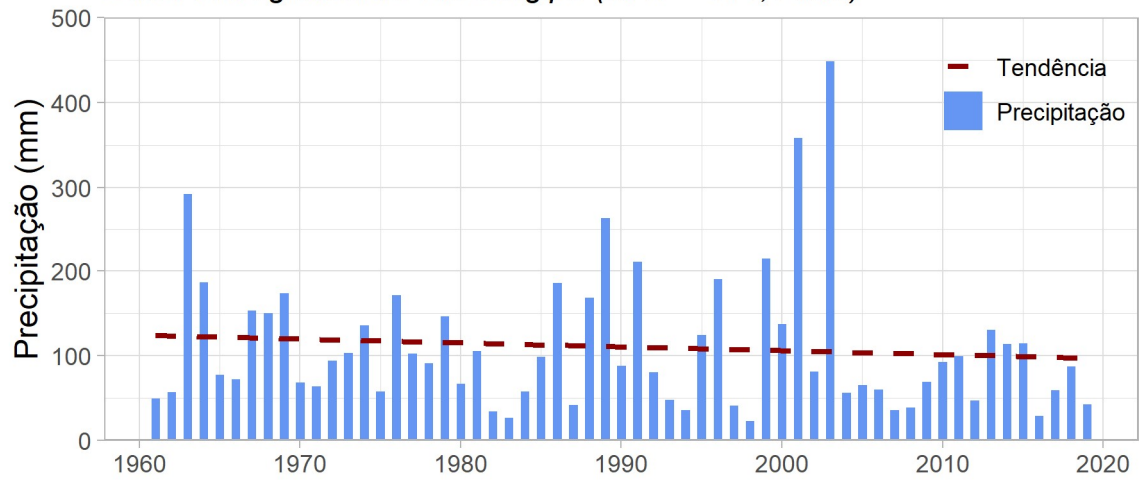
Precipitação Trimestre Mais Seco (Nov-Dez-Jan)
Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (MLT = 90,6 mm)



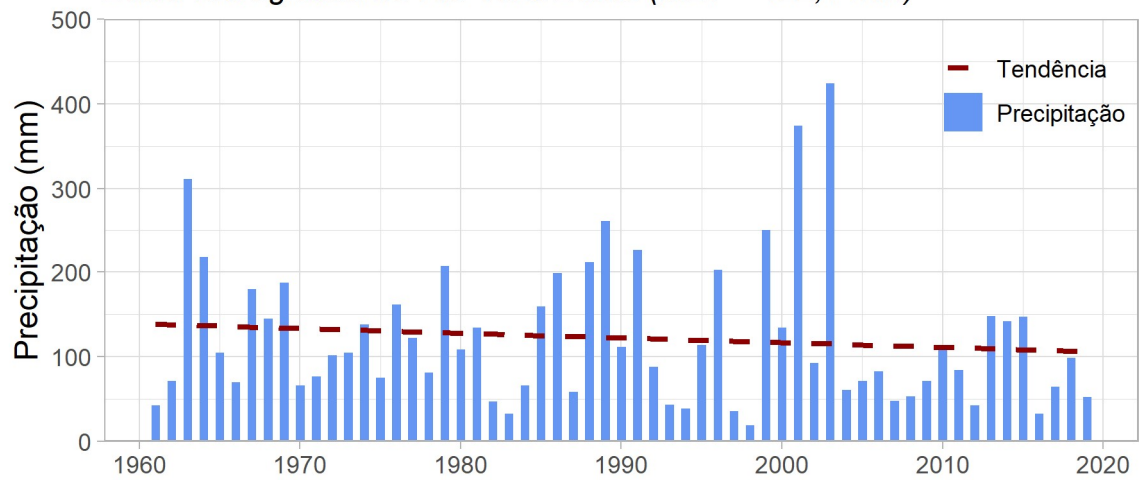
Precipitação Trimestre Mais Seco (Nov-Dez-Jan)
Bacia Hidrográfica do Sapucaia (MLT = 108,3 mm)



Precipitação Trimestre Mais Seco (Nov-Dez-Jan)
Bacia Hidrográfica do Rio Sergipe (MLT = 110,3 mm)



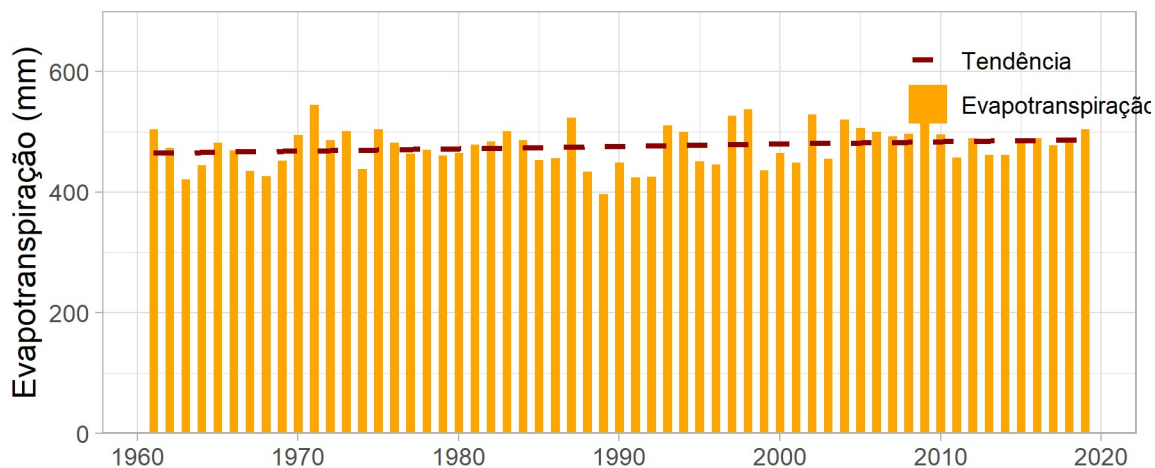
Precipitação Trimestre Mais Seco (Nov-Dez-Jan)
Bacia Hidrográfica do Rio Vaza Barris (MLT = 122,1 mm)



Apêndice G – Evapotranspiração do Trimestre Mais Seco (TMS) por bacia.

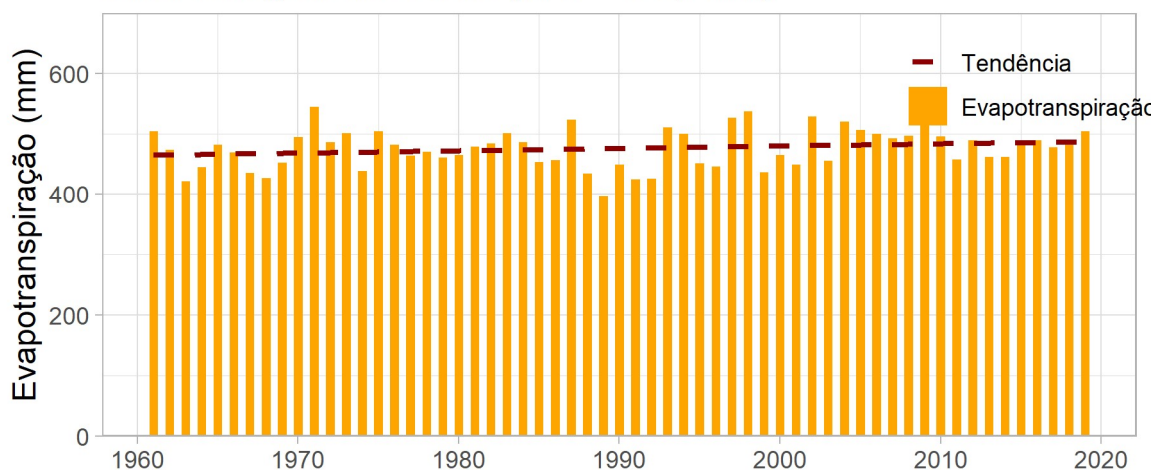
Evapotranspiração do Trimestre Mais Seco (Nov-Dez-Jan)

Bacia Hidrográfica do Abaís (MLT = 476,1 mm)



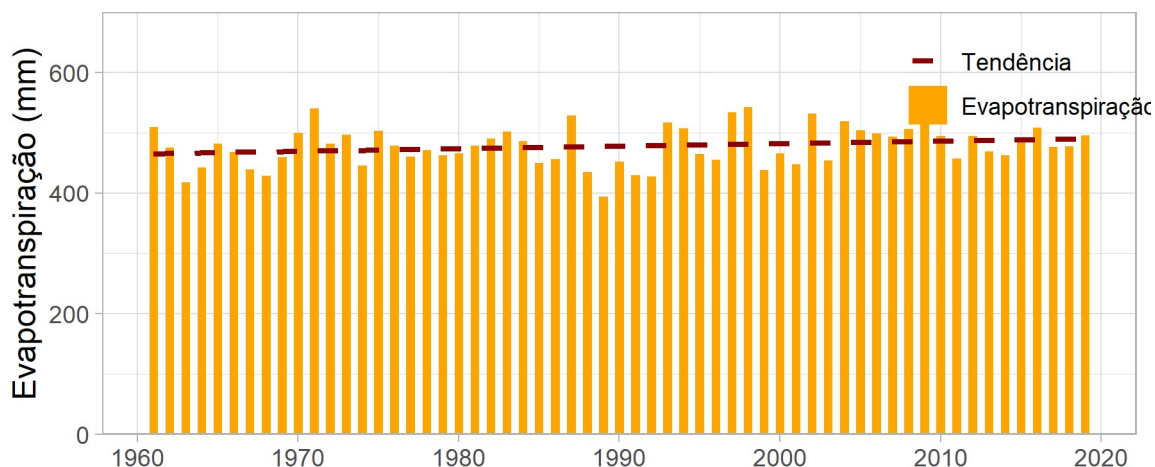
Evapotranspiração do Trimestre Mais Seco (Nov-Dez-Jan)

Bacia Hidrográfica do Abaís (MLT = 476,1 mm)

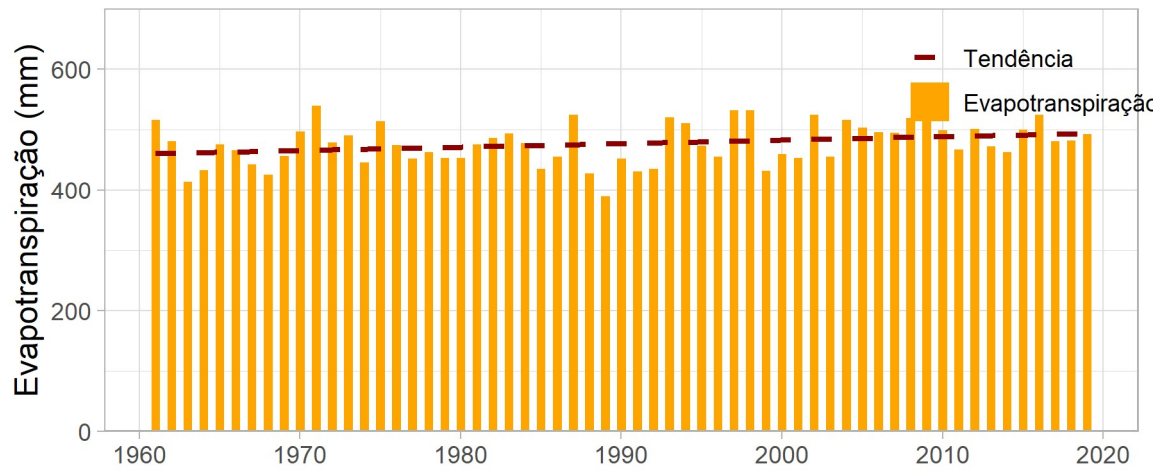


Evapotranspiração do Trimestre Mais Seco (Nov-Dez-Jan)

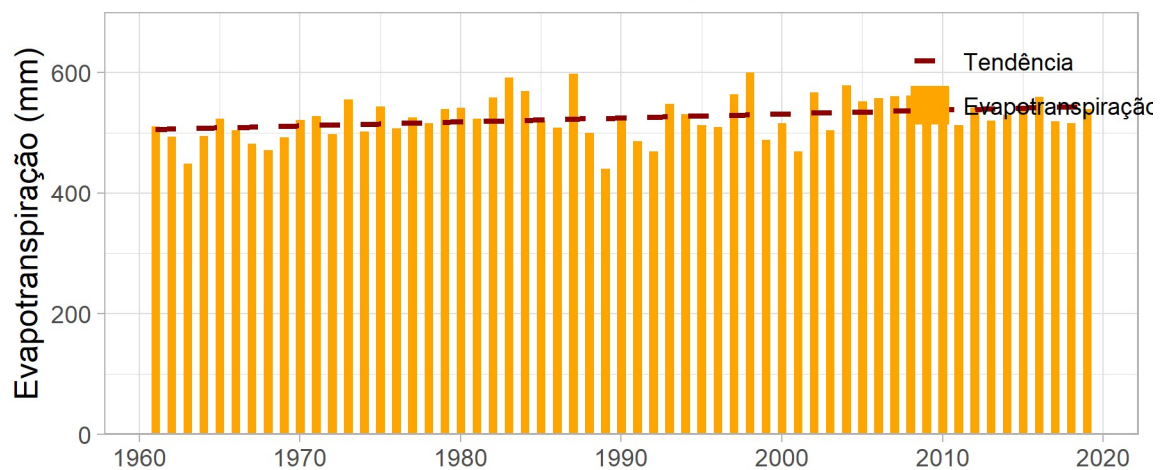
Bacia Hidrográfica do Rio Piauí (MLT = 478,1 mm)



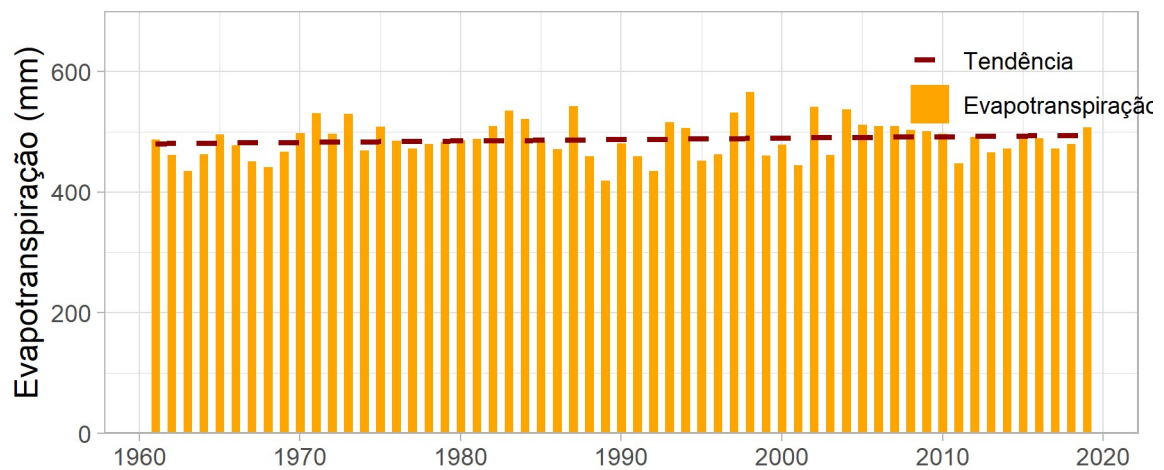
Evapotranspiração do Trimestre Mais Seco (Nov-Dez-Jan)
Bacia Hidrográfica do Rio Real (MLT = 477,2 mm)



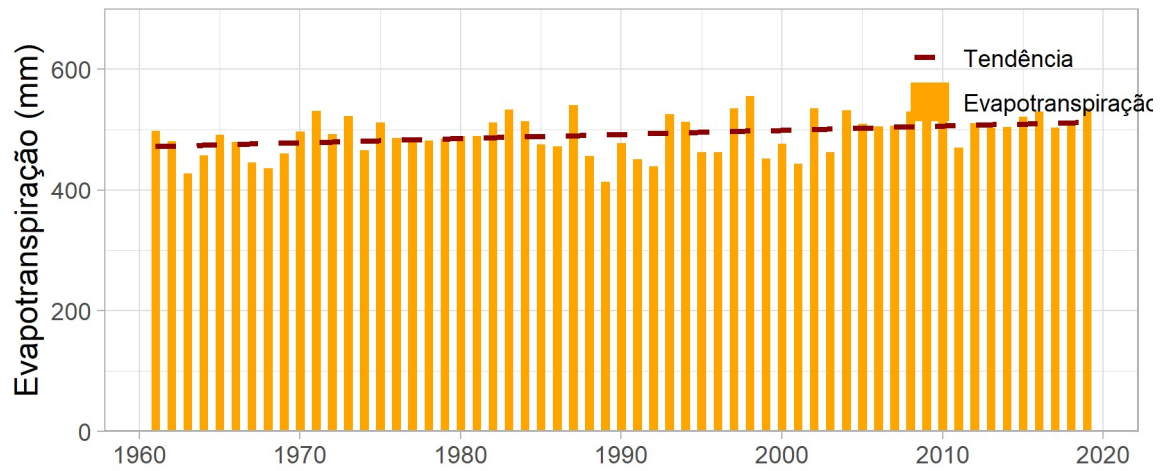
Evapotranspiração do Trimestre Mais Seco (Nov-Dez-Jan)
Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (MLT = 524,7 mm)



Evapotranspiração do Trimestre Mais Seco (Nov-Dez-Jan)
Bacia Hidrográfica do Sapucaia (MLT = 487,3 mm)



Evapotranspiração do Trimestre Mais Seco (Nov-Dez-Jan)
Bacia Hidrográfica do Rio Sergipe (MLT = 492,3 mm)



Evapotranspiração do Trimestre Mais Seco (Nov-Dez-Jan)
Bacia Hidrográfica do Rio Vaza Barris (MLT = 489,1 mm)

