



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

ANDRÉ DOS ANJOS CORREIA

**AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS BIOFÍSICOS E CARACTERIZAÇÃO
MORFOMÉTRICA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CAPIÁ EM ALAGOAS**

RECIFE – PE

2024

ANDRÉ DOS ANJOS CORREIA

**AVALIAÇÃO DE PARAMÊTROS BIOFÍSICOS E CARACTERIZAÇÃO
MORFOMÉTRICA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CAPIÁ EM ALAGOAS**

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

Orientador: Prof. Dr. Fabrício Marcos Oliveira Lopes

RECIFE – PE

2024

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

C824a

Correia, André dos Anjos
AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS BIOFÍSICOS E CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA NA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO CAPIÁ EM ALAGOAS / André dos Anjos Correia. - 2024.
104 f. : il.

Orientador: Pabrcio Marcos Oliveira Lopes.
Inclui referências.

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

1. HEC-HMS. 2. MODIS. 3. Mann-Kendall. 4. MapBiomias. 5. CHIRPS. I. Lopes, Pabrcio Marcos
Oliveira, orient. II. Título

CDD 630

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por guiar meus passos à conclusão deste trabalho.

Aos meus pais, Elenusa Rodrigues do Anjos e José Ailton dos Santos Correia, e aos meus irmãos Alexandre dos Anjos Correia, Ana Cleia dos Anjos Correia e Sabrina dos Anjos Correia, pela motivação e apoio nesta jornada.

À minha família em geral, pelo apoio e incentivo.

A Universidade Federal Rural de Pernambuco e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) pela concessão da bolsa de estudo.

Ao meu orientador Fabrício Marcos Oliveira Lopes, pela excelente orientação, dedicação, apoio e confiança.

À banca avaliadora: José Madson da Silva e Geber Barbosa de Albuquerque Moura.

Aos colegas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola que, direta ou indiretamente, contribuíram para a conclusão deste trabalho.

Aos colegas da Graduação em Engenharia Agrônômica que, mesmo após a conclusão, permaneceram ao meu lado, torcendo e incentivando.

Aos amigos Valéria (Lela) e Francisco (Chiquinho), pelo acolhimento na cidade de Recife durante a minha moradia. Pessoas simples, mas de grande bondade. Lembro-me das ligações da Lela: “André, venha almoçar com a gente!”.

“O ser humano nasce ignorante, mas não idiota. Ele torna-se idiota pela educação que recebe da sociedade.”

(Bertrand Russell)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representação de uma bacia hidrográfica.	18
Figura 2. Localização da área de estudo – bacia hidrográfica do Rio Capiá.	29
Figura 3. Fluxograma das etapas metodológicas do projeto.	31
Figura 4. Divisão da bacia hidrográfica do rio Capiá em Sub-bacias e a distribuição da rede de drenagem.	43
Figura 5. Representação da hierarquia dos cursos d'água segundo o método de Strahler (1957); b) Mapa de inclinação ou declividade do terreno classificado em classes.	48
Figura 6. Boxplot (a) e regressão linear com reta 1:1 (b) da média anual de precipitação pluvial (mm).	50
Figura 7. Boxplot sobre os dados de precipitação: A) estação de Piranhas, B) estação de Mata Grande, C) estação de Canapi e D) estação Pão de Açúcar.	51
Figura 8. Reta de Regressão e coeficiente de determinação para os dados mensais de precipitação.	52
Figura 9. Valores mensais médios de precipitação pluvial de estações terrestres da ANA e estimados pelo CHIRPS.	55
Figura 10. Alterações espaço-temporais em relação ao uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do rio Capiá entre os anos 2000 e 2021. Fonte: MapBiomias (2023) e adaptado pelo autor.	58
Figura 11. Evolução temporal do bioma caatinga, áreas destinadas à agropecuária e corpos d'água na bacia hidrográfica no período de 2000 a 2021.	59
Figura 12. Distribuição espaço-temporal da precipitação pluvial estimada pelo CHIRPS na bacia hidrográfica do rio Capiá.	61
Figura 13. Distribuição espaço-temporal do NDVI na bacia hidrográfica do rio Capiá.	63
Figura 14. Distribuição espaço-temporal do SAVI na bacia hidrográfica do rio Capiá.	65
Figura 15. Distribuição espaço-temporal do IAF na bacia hidrográfica do rio Capiá.	67
Figura 16. Distribuição espaço-temporal do NDWI na bacia hidrográfica do rio Capiá.	69
Figura 17. Distribuição espaço-temporal da Evapotranspiração real na bacia hidrográfica do rio Capiá.	71
Figura 18. Distribuição espaço-temporal da Evapotranspiração Potencial na bacia hidrográfica do rio Capiá.	73
Figura 19. Distribuição espaço-temporal da Temperatura na bacia hidrográfica do rio Capiá.	75
Figura 20. Distribuição anual acumulada da precipitação pluvial (mm) e médias anuais de NDVI, SAVI, IAF e NDWI na bacia hidrográfica do rio Capiá de 2000 a 2021.	78
Figura 21. Comportamento do Índice de Área Foliar (IAF) e da Temperatura da superfície (Ts) de 2000 a 2021 na bacia hidrográfica do rio Capiá.	79

Figura 22. Distribuição da chuva acumulada anual (mm), Evapotranspiração potencial e real (mm) na bacia hidrográfica do rio Capiá no período de 2000 a 2021.....	81
Figura 23. Distribuição mensal dos índices biofísicos na bacia hidrográfica do rio Capiá no período de 2000 a 2021.....	82
Figura 24. Distribuição mensal da Precipitação, ETr, Temperatura da superfície e ETP na bacia hidrográfica do rio Capiá no período de 2000 a 2021.....	83
Figura 25. Representação espacial da magnitude da tendência (A) e significância (B) da precipitação pluvial.....	86
Figura 26. Representação espacial da magnitude da tendência (A) e da significância (B) do NDVI.....	87
Figura 27. Representação espacial da magnitude da tendência (A) e da significância (B) do SAVI.....	88
Figura 28. Representação espacial da magnitude da tendência (A) e da significância (C) do IAF.....	88
Figura 29. Representação espacial da magnitude da tendência (A) e da significância (B) do NDWI.....	89
Figura 30. Representação espacial da magnitude da tendência (A) e da significância (B) do ETr.....	89
Figura 31. Representação espacial da magnitude da tendência (A) e significância (B) do ETP.....	90
Figura 32. Representação espacial da magnitude da tendência (A) e significância (B) da Temperatura da superfície (Ts).....	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características espectrais e espaciais do sensor MODIS.....	24
Tabela 2. Lista das estações meteorológicas na área de estudo.	31
Tabela 3. Classificação para os regimes pluviométricos.	34
Tabela 4. Classificação para índice de sinuosidade.	37
Tabela 5. Classificação para sinuosidade do rio principal.	38
Tabela 6. Classificação para uso e cobertura da terra segundo o MapBiomas.	40
Tabela 7. Características geométricas da bacia hidrográfica do rio Capiá.	44
Tabela 8. Características Hidrográficas da bacia do rio Capiá.	46
Tabela 9. Características de relevo da bacia hidrográfica do rio Capiá.	47
Tabela 10. Classes de relevo da bacia hidrográfica Capiá.	48
Tabela 11. Teste de significância da regressão para média anual de precipitação. .	50
Tabela 12. Teste de significância da regressão para as estações da ANA.	53
Tabela 13. Parâmetros estatísticos dos dados de precipitação estimados pelo CHIRPS na escala mensal e anual.	54
Tabela 14. Classificação dos anos segundo a metodologia proposta por Pincayan (1966).....	56
Tabela 15. Estatística descritiva da precipitação estimada pelo CHIRPS na bacia hidrográfica do rio Capiá.	62
Tabela 16. Estatística descritiva do NDVI na bacia hidrográfica do rio Capiá.	64
Tabela 17. Estatística descritiva do SAVI na bacia hidrográfica do rio Capiá.	66
Tabela 18. Estatística descritiva do IAF na bacia hidrográfica do rio Capiá.	68
Tabela 19. Estatística descritiva para NDWI na bacia hidrográfica do rio Capiá.	70
Tabela 20. Estatística descritiva para ETr na bacia hidrográfica do rio Capiá.	72
Tabela 21. Estatística descritiva para ETP na bacia hidrográfica do rio Capiá.	74
Tabela 22. Estatística descritiva para temperatura da superfície na bacia hidrográfica do rio Capiá.	76
Tabela 23. Coeficiente de correlação de Pearson para os índices biofísicos em escala anual.	84
Tabela 24. Coeficiente de correlação de Pearson para os índices biofísicos em escala mensal.....	85

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
IAF	Índice de área foliar
NDWI	Normalized Difference Water Index
SAVI	Soil-Adjusted Vegetation Index
MNDWI	Modified Normalized Difference Water Index
Ts	Temperatura da superfície
ETr	Evapotranspiração real
ETP	Evapotranspiração potencial
CHIRPS	Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data
USGS	United States Geological Survey
UCSB	University of California, Santa Barbara
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NCDC	National Climatic Data Center Climatics
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
ANA	Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico
CEMADEN	Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais
EOS	Earth Observing System
NASA	National Aeronautics and Space Administration
GEE	Google Earth Engine
API	Interface de programação de aplicativo
IDE	Ambiente de desenvolvimento interativo
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
MDE	Modelo Digital de Elevação
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
NIR	infravermelho próximo
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
SWIR	infravermelho médio
RMSE	Erro Quadrático médio da Raiz
EMP	Erro médio percentual

LISTA DE SÍMBOLOS

r	Coeficiente de correlação
r^2	Coeficiente de determinação
nm	Nanômetro
m	Metro
L	Constante de ajuste do solo
ln	Logaritmo natural ou neperiano
Km ²	Quilometro quadrado
°C	Grau Celsius
%	Porcentagem
Kc	Coeficiente de compacidade
P	Perímetro
A	Área
Kf	Fator de forma
Ic	Índice de circularidade
Re	Razão de alongação
km km ⁻²	Quilômetro por quilometro quadrado
km	Quilômetro
Dh	Densidade hidrográfica
N	Número de seguimentos de rios
Is	Índice de sinuosidade
R	Comprimento do rio principal
Lrp	Comprimento do talvegue do rio principal
Lm	Extensão média do escoamento superficial
Rd	Comprimento da rede de drenagem
Srp	Sinuosidade do rio principal
T	Razão de textura
Nt	Seguimento de rios
P	Perímetro
S1	Declividade de álveo
m m ⁻²	Metro por metro quadrado
Ir	Índice de rugosidade
Δa	Amplitude altimétrica
Dd	Densidade de drenagem
Rr	razão de relevo
K	Kelvin
Dp	Desvio padrão
CV	Coeficiente de variação
S	Significância de Mann-Kendall
Σ	Sigma (somatório)
<	Menor que
>	Maior que

=	Igual
≤	Menor ou igual que
≥	Maior ou igual que
M	Médio
Var	Variância
Z	Teste estatístico

Correia, A. A. **Avaliação de parâmetros biofísicos e caracterização morfométrica na bacia hidrográfica do rio Capiá em Alagoas**. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife Pernambuco, Brasil.

RESUMO

A bacia hidrográfica do rio Capiá desempenha um papel fundamental no gerenciamento dos recursos hídricos e no planejamento ambiental. No entanto, está sujeita a uma exploração inadequada de seus recursos e à atividade humana, o que afeta negativamente a dinâmica dos ecossistemas como um todo. Nos últimos anos, os impactos causados pela exploração da flora, como o desmatamento das matas ciliares e a redução da vegetação nativa, têm gerado um grande problema na região: a erosão do solo. Diante disso, o objetivo deste estudo foi avaliar os parâmetros biofísicos e relacioná-los com as características morfométricas na bacia hidrográfica do rio Capiá, em Alagoas, Brasil. Para isso, foi realizado um estudo de caracterização morfométrica da bacia por meio de um Modelo Digital de Elevação (MDE) obtido pelo satélite ALOS PALSAR, utilizando o REC-HMS. As imagens classificadas do uso e cobertura vegetal do MapBiomas entre 2000 a 2021 foram utilizadas para avaliar o grau de degradação da bacia. Os dados do CHIRPS foram utilizados na técnica de Quantis para classificar os anos de precipitação extrema em um período de 30 anos (1993 a 2022). Em seguida, os dados do sensor MODIS foram utilizados para obter os parâmetros biofísicos NDVI, IAF, NDWI, ETr, ETP e temperatura da superfície, a fim de criar uma série histórica e períodos de três anos, no intervalo de 2000 a 2021. Esses dados foram relacionados com os anos de precipitação extrema e o uso e cobertura vegetal. As análises de tendência dos parâmetros biofísicos e do Mapbiomas foram estimadas utilizando o teste não-paramétrico de Mann-Kendall, juntamente com o teste de Thei-Sen. Além disso, foram realizadas análises estatísticas descritivas. Em relação as características da bacia hidrográfica, a bacia apresentou formato alongado com baixa propensão a enchentes, rio principal com características tortuosas e 63,95% da área da bacia é considerada plana. O CHIRPS apresentou boa performance, mas tendência de superestimar. O ano mais seco foi 2012 (269,24 mm) e o ano mais chuvoso foi 2005 (721,68 mm). Predominância de áreas destinadas à agropecuária, principalmente em regiões planas; relação temporal inversa entre bioma caatinga e áreas de agropecuária; e bioma caatinga predomina em locais de baixo acesso para seres humanos. Altitude e declividade elevadas promovem índices mais elevados de vegetação e áreas de pastagens influenciam na diminuição dos índices de vegetação e aumento da temperatura da superfície. Baixas médias anuais de Precipitação, NDVI, SAVI, IAF e NDWI; período chuvoso e seco bem delimitados; e ascendência dos índices de vegetação no período chuvoso e queda no período seco. Para as correlações e Influências dos Índices de Vegetação: boa correlação com precipitação pluvial, redução da temperatura da superfície e elevação da evapotranspiração em resposta aos índices de vegetação. Diminuição anual da precipitação, com maior intensidade em regiões de grande altitude e menor intensidade em regiões de baixa altitude.

Palavras-chave: HEC-HMS, MODIS, Mann-Kendall, MapBiomas, CHIRPS.

Correia, A. A. **Assessment of biophysical parameters and morphometric characterization in the Capiá river basin in Alagoas**. 2024. Dissertation (Master's in Agricultural Engineering) - Federal Rural University of Pernambuco, Recife Pernambuco, Brazil.

Abstract

The Capiá River basin plays a fundamental role in the management of water resources and environmental planning. However, it is subject to inadequate exploitation of its resources and human activity, which negatively affects the dynamics of ecosystems as a whole. In recent years, the impacts caused by the exploitation of flora, such as the deforestation of riparian forests and the reduction of native vegetation, have generated a major problem in the region: soil erosion. Therefore, the objective of this study was to evaluate the biophysical parameters and relate them to the morphometric characteristics in the Capiá river basin, in Alagoas, Brazil. To this end, a morphometric characterization study of the basin was carried out using a Digital Elevation Model (DEM) obtained by the ALOS PALSAR satellite, using REC-HMS. The classified images of MapBiomass use and vegetation cover between 2000 and 2021 were used to assess the degree of degradation of the basin. CHIRPS data were used in the Quantis technique to classify years of extreme precipitation over a 30-year period (1993 to 2022). Then, MODIS sensor data was used to obtain the biophysical parameters NDVI, IAF, NDWI, ETr, ETP and surface temperature, in order to create a historical series and three-year periods, in the range of 2000 to 2021. These Data were related to years of extreme precipitation and vegetation use and cover. Trend analyzes of biophysical parameters and Mapbiomas were estimated using the non-parametric Mann-Kendall test, together with the Thei-Sen test. In addition, descriptive statistical analyzes were performed. Regarding the characteristics of the river basin, the basin had an elongated shape with low propensity to floods, the main river has tortuous characteristics and 63.95% of the basin area is considered flat. CHIRPS performed well, but tended to overestimate. The driest year was 2012 (269.24 mm) and the wettest year was 2005 (721.68 mm). Predominance of areas destined for agriculture, mainly in flat regions; inverse temporal relationship between the caatinga biome and agricultural areas; and the caatinga biome predominates in places with low access for humans. High altitude and slope promote higher rates of vegetation and pasture areas influence the decrease in vegetation rates and increase in surface temperature. Low annual averages of Precipitation, NDVI, SAVI, IAF and NDWI; well-defined rainy and dry periods; and increase in vegetation indices in the rainy season and decline in the dry season. For correlations and Influences of Vegetation Indices: good correlation with rainfall, reduction in surface temperature and increase in evapotranspiration in response to vegetation indices. Annual decrease in precipitation, with greater intensity in high-altitude regions and lower intensity in low-altitude regions.

Keywords: HEC-HMS, MODIS, Mann-Kendall, MapBiomass, CHIRPS.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVOS	16
2.1. Objetivo geral	16
2.2. Objetivos específicos	16
3. REFERENCIAL TEÓRICO	17
3.1. A bacia hidrográfica do rio Capiá	17
3.2. Aplicação do sensoriamento remoto em bacias hidrográficas	17
3.3. Análise morfométrica de bacias hidrográficas	19
3.4. CHIRPS	21
3.5. Sensor MODIS	23
3.6. Plataforma <i>Google Earth Engine</i>	24
3.7. Parâmetros biofísicos	25
3.8. MapBiomas	27
4. MATERIAL E MÉTODOS	28
4.1. Caracterização da área de estudo	28
4.2. Etapas Metodológicas do estudo	30
4.3. Dados meteorológicos	31
4.4. Dados Orbitais	31
4.4.1. Modelo Digital de Elevação (MDE)	32
4.4.2. Produtos do Sensor MODIS	32
4.4.3. CHIRPS	32
4.5. Processamento	33
4.5.1. Técnica de Quantis	33
4.5.2. Características morfométricas	34
4.5.3. Parâmetros biofísicos	39
4.5.4. Uso e cobertura da terra	40
4.6. Análise estatística	41
5. Resultados e Discussão	42
5.1. Morfometria	42
5.2. Validação da precipitação pluvial do CHIRPS	49
5.3. Técnica de Quantis	55
5.4. Uso e cobertura da terra	56

5.5. Índices biofísicos	59
5.6. Análise estatística dos índices biofísicos.....	83
6. CONCLUSÕES	91
7. REFERÊNCIAS.....	92

1. INTRODUÇÃO

As bacias hidrográficas desempenham um papel fundamental no gerenciamento dos recursos hídricos e no planejamento ambiental. No entanto, elas estão sujeitas à má exploração de seus recursos devido à atividade humana, o que afeta a dinâmica dos ecossistemas como um todo (Pimentel, 2015; Rodrigues *et al.*, 2016).

Nesse sentido, a bacia hidrográfica do rio Capiá, que abastece o rio São Francisco, tem passado por transformações nos últimos anos devido os impactos gerados pela exploração da flora, principalmente o desmatamento das matas ciliares e o desmatamento de áreas de vegetação para pastagens. Isso tem causado um grande problema de degradação na bacia, como a erosão do solo, que gera um efeito cascata de assoreamento dos rios, perda de toneladas de solo e diminuição da fertilidade de áreas produtivas, o que desvaloriza as propriedades rurais (Holanda *et al.*, 2011; Gama *et al.*, 2021).

Em 2009, Silva e colaboradores analisaram o grau de erodibilidade e perdas de solo na bacia do rio Capiá, utilizando Sistema de Informação Geografia (SIG) e Sensoriamento Remoto. Os resultados mostraram que 24% da bacia apresenta alta suscetibilidade à erosão e 65% da área da bacia registra perda anual de solo entre 0 e 30 ton/ha/ano. Diante desse contexto, é de extrema importância realizar estudos sobre os processos de degradação do solo e avaliar as condições da vegetação na região.

A degradação dos recursos hídricos pode estar relacionada à falta de informações sobre o estado da vegetação e às características da bacia, como sua forma, relevo e rede de drenagem. Além disso, essas informações são essenciais para esclarecer dúvidas relacionadas à compreensão da dinâmica hídrica e da vulnerabilidade ambiental, o que pode ter impactos no estado econômico e social da população local e das áreas adjacentes.

Por meio de um Modelo Digital de Elevação (MDE), é possível realizar estudos morfométricos e diagnóstico ambiental de uma área, como uma bacia hidrográfica. Para isso, a aplicação de SIG torna-se essencial no processamento dos dados e nas gerações das informações.

Além do geoprocessamento, as técnicas de sensoriamento remoto destacam-se pela capacidade de estimar parâmetros biofísicos, como o índice de vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), o índice de Vegetação Ajustada ao Solo (SAVI), o

Índice de Área Foliar (IAF), o índice de Água por Diferença Normalizada (NDWI) e evapotranspiração (Running; Um; Zhao, 2021; Caetano *et al.*, 2022).

O sensoriamento remoto é uma tecnologia que permite obtenção de imagens e outros tipos de dados da superfície terrestre, por meio da captação e registro da energia refletida ou emitida pelos alvos da superfície da Terra. Isso é possível graças ao uso de sensores terrestres, suborbitais e orbitais, com diferentes resoluções espaciais e temporais (Lorenzetti, 2015; Löbler *et al.*, 2019). Esses sensores são capazes de explorar as propriedades espectrais da vegetação e, com isso, realizar diversos estudos sobre o comportamento da vegetação em termos espaciais e temporais.

Dessa forma, os parâmetros biofísicos ou índices de vegetação, de uma bacia hidrográfica, associados às características morfométricas, à cobertura florestal, ao uso e cobertura da terra e aos dados climáticos, podem determinar a vulnerabilidade de cada bacia para as inundações, secas, processos erosivos e perdas de matéria orgânica, nutrientes e microfauna, que podem levar ao assoreamento e eutrofização dos corpos hídricos.

Nesse contexto, o projeto contribuirá para produzir informações de qualidade sobre as alterações ambientais da bacia do rio Capiá por meio da integração de imagens de satélite a um modelo hidrológico. Além disso, ele poderá auxiliar futuros projetos de reflorestamentos da área, de manejo e conservação de solo e água, e de recuperação e preservação de nascentes, visando minimizar a degradação causada pela erosão.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

- Avaliar os parâmetros biofísicos e relacioná-los com as características morfométricas da bacia hidrográfica do rio Capiá em Alagoas, Brasil.

2.2. Objetivos específicos

- Descrever as características e índices morfométricos da bacia do rio Capiá e relacioná-los com o uso e cobertura da terra;

- Determinar os anos de precipitação extremos e compará-los com os parâmetros biofísicos: NDVI, SAVI IAF, NDWI, temperatura da superfície, evapotranspiração potencial e real.
- Comparar os parâmetros biofísicos no espaço e no tempo com o uso e cobertura da terra.
- Analisar a tendência espacial dos parâmetros biofísicos usando testes não paramétricos de Mann-Kendall e Thei-Sen.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. A bacia hidrográfica do rio Capiá

A bacia hidrográfica do rio Capiá está localizada no Semiárido Brasileiro entre os estados de Alagoas e de Pernambuco, predominantemente no estado de Alagoas. O rio principal, Capiá, atravessa o Sertão de Alagoas no sentido Norte – Sul com desague no rio São Francisco.

A bacia hidrográfica, além de sua importância no ciclo hidrológico para a região onde está inserida, é também de extrema importância para a população local, pois fornece recursos naturais necessários para a sobrevivência humana. Apesar da importância dos recursos hídricos para a região, é comum observar a falta de proteção em áreas de matas ciliares, ou até mesmo desmatamentos ilegais, comprometendo este valioso recurso natural (Marinho *et al.*, 2021).

A região, onde estão inseridas a Bacia hidrográfica, é composta pela vegetação do Bioma Caatinga, região que tipicamente apresenta baixa precipitação pluviométrica com períodos prolongados de seca, ocasionando baixos níveis de água no solo agricultável (Santos *et al.*, 2017; Santos *et al.*, 2020). A principal atividade na região é a agropecuária, sendo o milho a cultura predominante para alimentação animal e humana. O Semiárido brasileiro é a região semiárida mais populosa do mundo com 23,05 habitantes por km² (Rufino; Silva, 2017)

3.2. Aplicação do sensoriamento remoto em bacias hidrográficas

Segundo Löbler *et al.* (2019), o Sensoriamento remoto refere-se à obtenção de imagens à distância por meios de sensores remotos, que normalmente estão acoplados a satélites terrestres, suborbitais e orbitais.

A captura das imagens pode ser realizada por sensores passivos ou ativos. Os sensores passivos capturam a energia solar refletida da superfície terrestre, enquanto os sensores ativos, como os radares, emitem pulsos eletromagnéticos que são parcialmente retroespalhados de volta ao sensor (Lorenzetti, 2015).

Por sua vez, uma bacia hidrográfica é uma área geográfica definida pela captação natural de água por precipitação pluvial, sendo composta por rios que convergem para um único ponto, chamado exultório (Souza *et al.*, 2021; Pimentel, 2015). As bacias hidrográficas são formadas por redes de drenagem, também conhecidas como redes hidrográficas, estas são canais que estão conectados entre si e que permitem a drenagem da água, que consistem em canais interconectados, como rios, córregos e riachos, que permitem a drenagem da água (Stein, 2017).

De acordo com Villela e Mattos (1975), a bacia hidrográfica é delimitada topograficamente por pontos de cotas elevadas que separam uma bacia da bacia hidrográfica vizinha. A Figura 1 ilustra esquematicamente uma bacia hidrográfica.

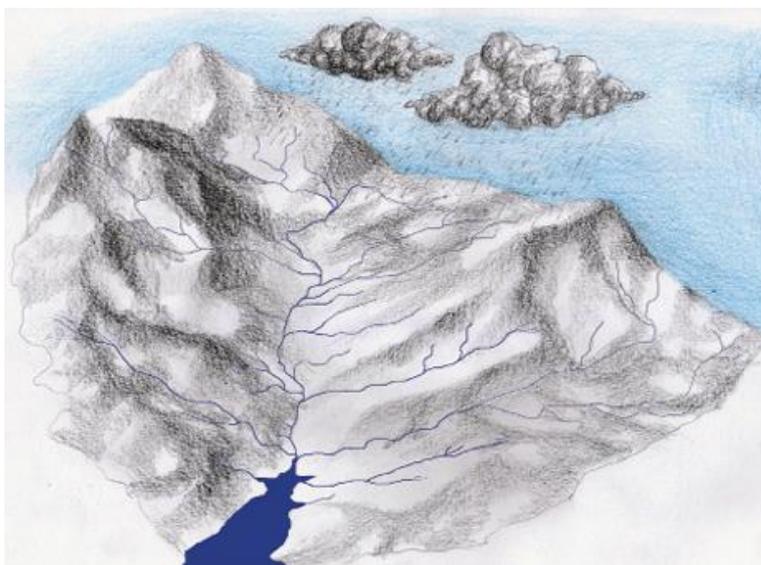


Figura 1. Representação de uma bacia hidrográfica.

Fonte: Pimentel (2015)

Através das técnicas de sensoriamento remoto, é possível estimar parâmetros biofísicos, tais como biomassa, avaliação da vegetação, desenvolvimento vegetal, uso e cobertura da terra, entre outros (Caetano *et al.*, 2022).

O sensoriamento remoto é amplamente utilizado no monitoramento ambiental, incluindo o monitoramento atmosférico, da superfície da Terra, dos oceanos e da criosfera terrestre. Para bacias hidrográficas, o sensoriamento remoto torna-se uma ferramenta fundamental para monitorar possíveis mudanças nos recursos naturais, uma vez que fornece a cobertura espacial e temporal necessárias para análises de eventos (Júnior; Dantas, 2018; Júnior; Ferreira, 2020).

3.3. Análise morfométrica de bacias hidrográficas

Morfometria está relacionada ao estudo da forma da bacia hidrográfica e às medidas das suas características físicas, como geometria, hidrografia (rede de drenagem) e relevo. Segundo Villela e Mattos (1975), as características físicas de uma bacia hidrográfica são elementos importantes para o estudo do comportamento hidrológico. Pode-se dizer que estes elementos físicos proporcionam a melhor oportunidade de compreender a variação no espaço dos elementos do regime hidrológico.

A caracterização morfométrica é um dos procedimentos mais comum nas análises hidrológicas ou ambientais, pois o conhecimento do ambiente físico é essencial para subsidiar o processo de ocupação e manejo das bacias hidrográficas (Marinho, 2021; Rodrigues *et al.*, 2016). Segundo Alves *et al.* (2014), conhecer as características morfométricas de uma bacia hidrográfica permite o planejamento da ocupação do espaço de maneira mais sustentável.

As características morfométricas relacionadas à geometria da bacia incluem, por exemplo, o coeficiente de compacidade, o fator de forma, o índice de circularidade e a razão de alongação.

De acordo com Cardoso *et al.* (2006), o coeficiente de compacidade relaciona a forma da bacia a um círculo, ou seja, relaciona o perímetro de uma bacia ao perímetro de um círculo com a mesma área da bacia. Esse coeficiente é adimensional e depende da forma da bacia em estudo. Quanto mais próximo da 1, mais circular é a bacia, e se afasta de 1, a forma da bacia se torna mais alongada (Villela; Mattos, 1975). A

interpretação desse coeficiente é que quanto mais próximo de 1, mais acentuada será a ocorrência de enchente na bacia.

O fator de forma é outro índice que indica a suscetibilidade da bacia a enchentes (Rodrigues *et al.*, 2016). O fator de forma é a relação entre a largura média e o comprimento axial da bacia (Villela; Mattos, 1975). Uma bacia com fator de forma baixo é menos propensa a enchentes do que outra bacia de tamanho semelhante, mas com fator de forma maior.

Segundo Cardoso *et al.* (2006), o índice de circularidade é semelhante ao coeficiente de compacidade, ou seja, tende a 1 à medida que a forma da bacia se aproxima de uma forma circular e diminui à medida que a forma se torna mais alongada.

A razão de alongação é a relação entre o diâmetro do círculo de área igual à área da bacia e o comprimento do eixo da bacia (MOSCA, 2003). Bacias com uma razão de alongação mais próximo da unidade são mais propensas a enchentes, uma vez que bacia mais alongadas têm pouca probabilidade de receber uma descarga de chuva em toda a sua extensão uniformemente.

As características morfométricas relacionadas à hidrografia (rede de drenagem) da bacia compreendem, por exemplo: Densidade de drenagem, Densidade hidrográfica, Extensão média do escoamento superficial, Índice de sinuosidade do rio principal, Sinuosidade do rio principal e Razão de textura. Esses índices afetam o comportamento hidrológico e litológico da bacia.

A densidade de drenagem ou comprimento médio dos córregos dentro da bacia por unidade de área é a relação entre o comprimento da rede de drenagem e a área da bacia (Horton, 1945). Segundo o mesmo autor, bacias mal drenadas têm densidade de drenagem de 2,74, enquanto as bem drenadas têm uma densidade de 0,73, ou seja, um quarto maior. Christofolletti (1980) afirma que a densidade de drenagem é reconhecida como uma das variáveis mais importantes na análise morfométrica de bacias hidrográficas.

A densidade de rios ou densidade hidrográfica é a relação entre o número de seguimentos de rios e a área da bacia. Segundo Christofolletti (1980), sua finalidade é comparar a frequência ou a quantidade de cursos de água existente em uma área de tamanho padrão.

A densidade hidrográfica foi primeiramente definida por Horton (1945). Se utilizarmos a ordenação de Horton, o número de canais corresponde à soma de todos

os seguimentos de cada ordem, porém, se utilizarmos a ordenação de Strahler (1957), o número de canais corresponde à quantidade de rios de primeira ordem, pois implica que todo e qualquer rio surge em uma nascente.

A extensão média do escoamento superficial é um índice que indica a distância média que a água da chuva deveria percorrer do ponto onde caiu no terreno da bacia, em linha reta, até próximo do leito de um curso d'água qualquer (Villela; Mattos, 1975)

O índice de sinuosidade é a relação entre o comprimento do rio principal e o comprimento do talvegue do rio principal (Schumm, 1963). A sinuosidade do rio principal possui a mesma relação do índice de sinuosidade, porém, não é apresentada de forma percentual.

As características morfométricas relacionadas ao relevo da bacia compreendem, por exemplo: a declividade do rio principal, o índice de rugosidade e a razão de relevo. Segundo Villela e Mattos (1975), o relevo influencia os fatores meteorológicos e hidrológicos, uma vez que a velocidade de escoamento é influenciada pela declividade do terreno, enquanto a temperatura, a precipitação e a evaporação, entre outros, são funções da altitude da bacia.

A declividade do álveo ou declividade do rio principal é a relação entre a variação de cota e o comprimento do rio principal, sendo um importante índice para se ter noção da velocidade de escoamento nos canais fluviais (Villela; Mattos, 1975).

Segundo Christofletti (1980), o índice de rugosidade combina as qualidades de declividade e comprimento das vertentes com a densidade de drenagem, sendo obtido a partir do produto entre a amplitude altimétrica, que é a diferença de nível da bacia, e a densidade de drenagem.

A razão de relevo é a relação entre a amplitude altimétrica e o comprimento axial da bacia (Christofletti, 1980). Segundo Salis *et al.* (2019), uma baixa razão de relevo indica baixos valores de velocidade de escoamento superficial, e as taxas de evapotranspiração aumentam quando o relevo é predominantemente voltado para o norte.

3.4. CHIRPS

O *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations* (CHIRPS) é um conjunto de dados de precipitação desenvolvido pelo *United States Geological Survey* (USGS) e pelo *Climate Hazards Group at the University of California*, Santa Barbara

(UCSB) (Costa *et al.*, 2019). O CHIRPS é composto por diferentes fontes de informações, tais como o The *Climate Hazards Group's Precipitation Climatology (CHPClim)*; Observações de satélites com espectroscopia de infravermelho termal (*Thermal Infrared, TIR*), geoestacionárias quase globais da *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)*; Centro de Previsão Climática (CPC); *National Climatic Data Center Climáticos (NCDC)*; *Coupled Forecast System da NOAA*, versão 2 (CFSv2); e dados observacionais de estações meteorológicas (SILVA *et al.*, 2020).

O produto CHIRPS possui uma resolução espacial de 0,05° ou aproximadamente 5 km, próximo a linha do equador, cobertura geográfica de 50°S a 50°N, com dados de 1981 até os dias atuais e é disponibilizado em conjuntos de dados diários, pentadais e mensais.

Segundo Silva *et al.* (2019), o CHIRPS tem como objetivo fornecer produtos quantitativos com alta resolução sobre as condições de precipitação para o monitoramento ambiental, visando melhorar a previsibilidade de períodos de secas regionais em várias partes do globo, garantindo assim a identificação de áreas suscetíveis à insegurança alimentar, especialmente nas regiões mais carentes de recursos, como grande parte da África oriental.

Rabelo *et al.* (2022) estudaram a correlação entre dados de superfície (postos pluviométricos) e dados de satélites (CHIRPS) em uma bacia hidrográfica na região semiárida e constataram que o produto CHIRPS apresentou resultados satisfatórios em relação à espacialização dos dados. Os autores também concluíram que os dados do CHIRPS apresentaram maior detalhamento em áreas sem postos pluviométricos, ou seja, maior representação espacial dos dados.

O produto CHIRPS apresenta a desvantagem de superestimar os maiores valores de precipitação e subestimar os menores valores de precipitação, com um erro que pode chegar a 100 mm a mais ou a menos (Rabelo *et al.*, 2022; Silva *et al.*, 2020; Paredes-Trejo; Barbosa; LAKSHMI, 2017). Santos *et al.* (2019) também descrevem que os resultados encontrados para região Nordeste brasileira tendem a superestimar e subestimar a precipitação, mas não ultrapassam os 5 mm.

Santos *et al.* (2019) concluíram que os padrões sazonais de precipitação no Nordeste brasileiro foram bem representados com os dados de chuva provenientes do produto CHIRPS no período de 1999 a 2017. Eles avaliaram o desempenho de duas fontes diferentes de dados de precipitação: uma proveniente de dados observacionais interpolados (CPTEC/INPE) e outra de dados obtidos pelo produto

CHIRPS. Os resultados encontrados pelos autores evidenciaram que os dados do CHIRPS se correlacionam bem com as observações em superfície, com um coeficiente de correlação igual a 0,94.

Estudando o desempenho de dados de precipitação estimados oriundos do produto CHIRPS em uma sub-bacia no nordeste do estado do Pará em relação aos dados observacionais das estações de superfície do INMET e ANA, Silva *et al.* (2020) citam que o coeficiente de correlação (r) entre a precipitação média acumulada anual do produto CHIRPS e a ANA foi de 0,99 (com índice de concordância $d = 0,97$), sendo esse o valor mais alto encontrado durante o período menos chuvoso ($r=0,99$), e o menor valor encontrado durante o período chuvoso ($r=0,86$). Para a relação entre o CHIRPS e o INMET, o r foi de 0,95 para a precipitação média acumulada anual. Além disso, é importante mencionar que o grau de precisão (d) foi de 0,81.

Costa *et al.* (2019) também encontraram resultados semelhantes aos apresentados pelos autores do parágrafo anterior na região Nordeste. Eles encontraram uma boa concordância entre os dados estimados pelo CHIRPS e os dados das estações meteorológicas, apresentando uma similaridade e um coeficiente de determinação de 98%.

3.5. Sensor MODIS

O sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) está presente nos dois satélites TERRA e AQUA do Programa EOS (*Earth Observing System*), lançados pela *National Aerospace and Space Administration* (NASA) para o mapeamento e o monitoramento da cobertura vegetal e uso da terra. Esses satélites estão localizados a uma altitude de aproximadamente 705 km e possuem 36 bandas espectrais para coleta de diversos tipos de informações. Sua cobertura global pode variar entre 1 a 2 dias, com resoluções que variam de 250m a 1000m (NASA, 2022).

Na Tabela 1, são apresentadas as bandas de refletância da superfície que são direcionadas para as aplicações terrestres, juntamente com suas resoluções espaciais.

Tabela 1. Características espectrais e espaciais do sensor MODIS.

Bandas	Bandas espectrais (nm)	Resolução espacial (m)
1 – Vermelha	620 - 670	250 - 500
2 – NIR*	841 - 876	
3 – Azul	459 - 479	500
4 – Verde	545 - 565	
5 – SWIR* 1	1230 - 1250	
6 – SWIR* 2	1628 - 1652	
7 – SWIR* 3	2105 - 2155	

NIR, infravermelho próximo; SWIR, banda do infravermelho médio.

Fonte: Adaptado de Developers (2022)

Existem muitos produtos de dados MODIS padrão disponíveis para o estudar das mudanças globais (MODIS, 2022). Os produtos MOD13Q1 e MYD13Q1 fornecem imagens com intervalos de 16 dias provenientes dos satélites TERRA e AQUA, respectivamente. Esses produtos incluem o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e o Índice de Vegetação Aprimorado (EVI). Os produtos MOD11A1 e MYD11A1 fornecem dados diários de temperatura da superfície terrestre e emissividade da superfície com resolução de 1000 m, provenientes das plataformas TERRA e AQUA, respectivamente.

As imagens fornecidas já são corrigidas para efeitos atmosféricos, como nuvens, aerossóis. Isso significa que as imagens são convertidas em refletâncias, permitindo uma relação direta entre os pixels e o comportamento espectral teórico e/ou verificado dos alvos na superfície.

3.6. Plataforma *Google Earth Engine*

O *Google Earth Engine* (GEE) é uma plataforma para análise científica e visualização de conjuntos de dados geoespaciais. Mais precisamente, é uma plataforma de computação em nuvem que foi lançada pelo *Google* em 2010. O *Earth Engine* hospeda imagens de satélite e as armazena em um arquivo de dados público que inclui imagens históricas da Terra com mais de quarenta anos (Gorelick *et al.*, 2017). A plataforma inclui todo o catálogo EROS (USGS/NASA) *Landsat*, vários conjuntos de dados *MODIS*, dados *Sentinel-1*, dados *NAIP*, dados de precipitação,

dados de temperatura da superfície do mar, dados climáticos *CHIRPS* e dados de elevação.

Essa plataforma de computação em nuvem possui uma interface de programação de aplicativo (API) acessível pela *web* e um ambiente de desenvolvimento interativo (IDE) associado à *web* que permite a prototipagem rápida e a visualização dos resultados. O *Code Editor* possui alguns elementos: editor de código *JavaScript*, exibição de mapa para visualizar conjuntos de dados geoespaciais e Ferramentas de desenho de geometria (DEVELOPERS, 2022). Embora a API do GEE inclua apenas linguagens de programação em *JavaScript* e *Python*, ela é capaz de atender às necessidades da maioria dos usuários (Zhao *et al.*, 2021)

O GEE é atualmente a plataforma de computação em nuvem mais popular na ciência do sistema terrestre. É utilizada para processar dados relacionados a uma variedade de campos relacionados às mudanças ambientais, tais como agricultura, água, cobertura da terra, uso da terra, desastres, mudança climática, solo, pântano, floresta e urbanização, bem como, outros campos (Zhao *et al.*, 2021)

3.7. Parâmetros biofísicos

O sensoriamento remoto pode ser utilizado no monitoramento ambiental de parâmetros biofísicos. Esses parâmetros podem ser medidos através dos índices de vegetação nas regiões semiáridas do Brasil (RÊGO *et al.*, 2012; Bezerra *et al.*, 2020).

O índice de vegetação por diferença normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index* - NDVI) é expresso pela razão entre a diferença das medidas da refletância nas faixas do infravermelho próximo e do vermelho e a soma dessas faixas.

O valor do NDVI pode variar em uma escala entre -1 e 1 e, quanto mais próximo de 1, maior a densidade de cobertura vegetal (ROUSE *et al.*, 1974; Benedetti *et al.*, 2013). É comumente expresso através da Equação 1:

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{Red}}{\text{NIR} + \text{Red}} \quad (1)$$

em que: NIR é a refletância do infravermelho próximo e Red é a refletância do vermelho.

O Índice de Vegetação Ajustada as Condições do Solo (*Soil Adjusted Vegetation Index - SAVI*) foi proposto por Huete (1988) que adaptou o NDVI para minimizar os efeitos do solo de fundo no sinal da vegetação ao incorporar uma constante de ajuste de solo, o fator L na equação do NDVI (Equação 2).

$$SAVI = \left[\frac{NIR - Red}{NIR + Red + L} \right] * (1 + L) \quad (2)$$

Esse fator é dependente do tipo de solo da área de estudo. O valor 1 é adotado para áreas com pouca vegetação, 0,5 para cobertura vegetal intermediária e 0,25 para vegetação muito densa (Huete, 1988; Allen *et al.*, 2007). Em regiões como no semiárido com vegetação de Caatinga, tem-se utilizado L = 0,5 (Silva; Galvêncio, 2012)

O Índice de Área Foliar (IAF) é definido pela razão entre a área foliar de toda a vegetação por unidade de área ocupada por essa vegetação. É um indicador de biomassa e resistência do dossel, que utiliza o SAVI como base no cálculo. O cálculo do IAF é feito pela Equação 3 (Allen *et al.*, 2002).

$$IAF = \frac{\ln\left(\frac{0,69 - SAVI}{0,59}\right)}{0,91} \quad (3)$$

O Índice de Água por Diferença Normalizada (*Normalized Difference Water Index - NDWI*) é um índice que indica a presença ou ausência de água na superfície e em superfície de vegetação. Assim como o NDVI, o NDWI está entre os índices radiométricos mais aplicados em estudos ambientais (Pereira *et al.*, 2018). Existem alguns métodos propostos para o cálculo de NDWI.

O primeiro método foi proposto por McFeeters (1996). Este índice é projetado para (1) maximizar a refletância da água usando comprimento de onda verde; (2) minimizar a baixa refletância do NIR devido às características da água; e (3) aproveitar a alta refletância do NIR devido à vegetação e características do solo. Como resultado, as características da água têm valores positivos e, portanto, são aprimoradas, enquanto a vegetação e o solo geralmente têm valores zero ou negativos e, portanto, são suprimidos (Equação 4):

$$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR} \quad (4)$$

em que: Green é refletância na banda do verde. Gao (1996) propôs outro método para o cálculo do NDWI, alterando a composição das refletâncias, ou seja, substituiu a refletância no verde pela refletância do infravermelho médio. Desse modo, diverge do proposto por McFeeters (1996) na definição. Enquanto o NDWI de McFeeters propõe destacar os corpos d'água no terreno, o NDWI de Gao propõe dar ênfase no teor de água presente na vegetação (Equação 5):

$$\text{NDWI(Gao)} = \frac{\text{NIR} - \text{SWIR}}{\text{NIR} + \text{SWIR}} \quad (5)$$

3.8. MapBiomias

O uso e a cobertura da terra possuem conceitos diferentes. A cobertura da terra é definida como a composição biofísica da superfície terrestre, ou seja, os diferentes tipos de componentes que a cobrem. Por outro lado, o uso da terra é frequentemente influenciado por fatores humanos, políticos e socioeconômicos (Aldhshan; Shafri, 2019).

O estudo sobre o uso e a cobertura da terra está fundamentada na necessidade de entender seus efeitos nas mudanças climáticas, afim de garantir a sustentabilidade, levando em conta os aspectos sociais, econômicos e ambientais (Sousa *et al.*, 2017). Nesse sentido, o propósito do MapBiomias é revelar as transformações do território brasileiro por meio de ciência precisa, ágil e de qualidade, além de disponibilizar informações sobre a cobertura e o uso da terra, visando a conservação e o manejo sustentável dos recursos naturais, como forma de combate às mudanças climáticas (MapBiomias, 2022).

O MapBiomias é uma rede colaborativa formada por ONGs, universidades e startups de tecnologia, cuja finalidade é realizar o mapeamento anual da cobertura e do uso da terra, bem como monitorar a superfície de água e as áreas afetadas por incêndios de forma mensal, utilizando dados a partir de 1985. O processamento dos dados é realizado de forma distribuída e automatizada, por meio de parceria com *Google Earth Engine* (GEE). Os mapas de uso e cobertura da terra são apresentados no formato matricial, com resolução espacial de 30m, e podem ser acessados através do link <https://mapbiomas.org/> (MapBiomias, 2022).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Caracterização da área de estudo

O estudo foi realizado na bacia hidrográfica do rio Capiá, localizada entre os estados de Alagoas e Pernambuco, na região semiárida do Nordeste brasileiro. Essa bacia é composta principalmente por rios temporários e deságua no rio São Francisco. Sua localização abrange as coordenadas entre 8°55'38" a 9°41'44" de latitude sul e de 37°19'38" a 37°47'26" de longitude oeste, com uma área aproximada de 2.341 km², sendo 2.224 km² (95 %) pertencem ao estado de Alagoas e os outros 117 km² (5 %) pertencem ao estado de Pernambuco (Figura 2). A bacia do rio Capiá engloba os municípios de Itaíba, Piranhas, Olho d'Água do Casado, Canapi, Manari, Pão de Açúcar, Mata Grande, Senador Rui Palmeira, São José da Tapera, Inhapi, Maravilha, Ouro Branco e Poço das Trincheiras. De acordo com o último censo (IBGE, 2022), a população estimada da bacia é de 100 mil pessoas.

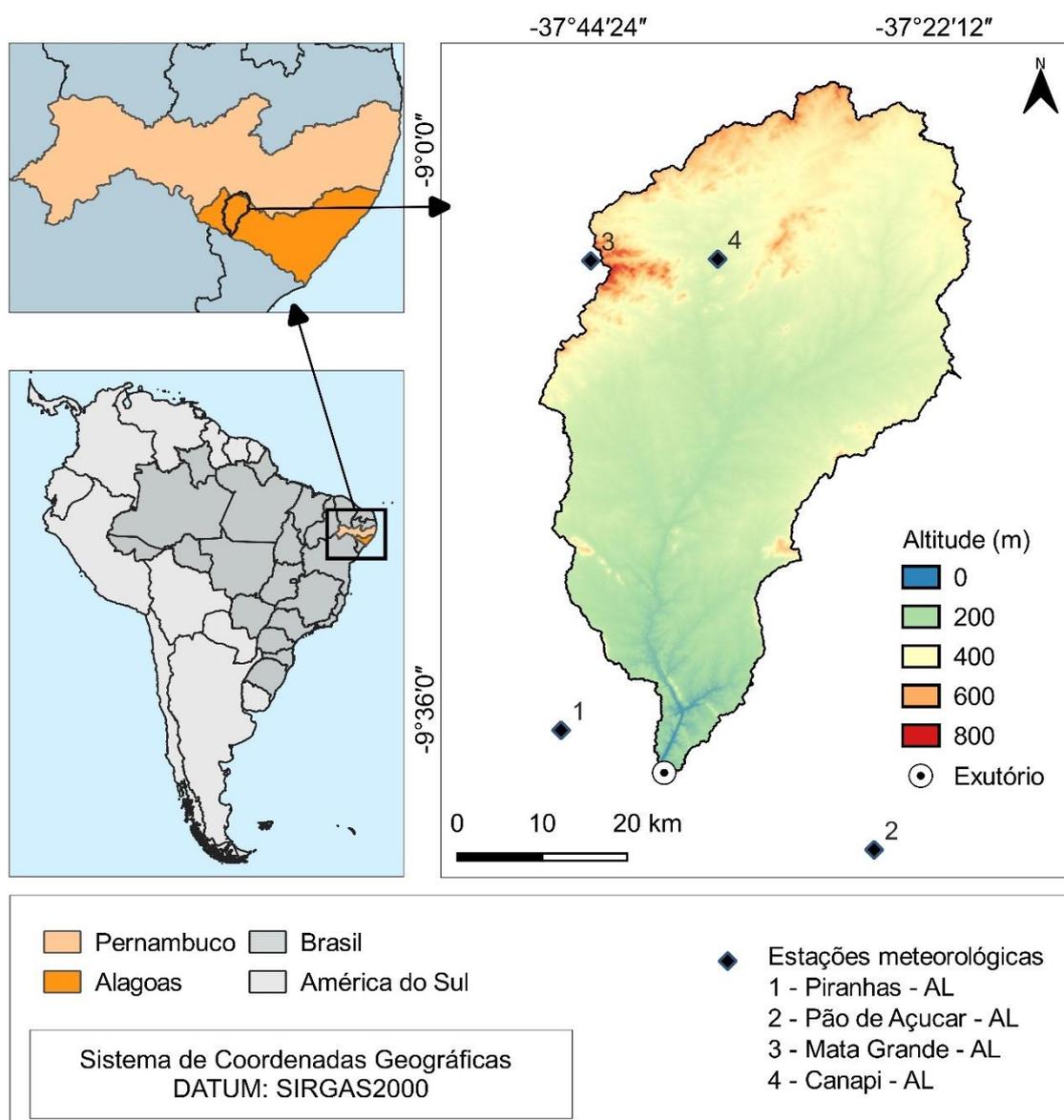


Figura 2. Localização da área de estudo – bacia hidrográfica do Rio Capiá.

O clima na região da bacia hidrográfica do rio Capiá, segundo a classificação de Köppen (1936), é do tipo BSh, ou seja, clima semiárido quente. A precipitação média anual na região da bacia hidrográfica varia de 400 a 600 mm, com a temperatura do ar variando entre 17°C a 33°C (Barros *et al.*, 2012). A área possui períodos seco e chuvoso bem definidos. O período chuvoso inicia no mês de abril e termina em agosto, enquanto que em setembro inicia-se o período seco, que se estende até março (Silva; Sousa, 2013).

A vegetação predominante é a Caatinga, compostas por plantas xerófilas. Suas espécies apresentam morfologias adaptadas ao estresse hídrico e às altas

temperaturas (Melo; Voltolini, 2019). O tipo de solo na área varia entre Luvisolo Cromico, Neosolo Litolico, Neosolo Regolítico e Plonossolo Háplico (SEPLANDE, 2021). A principal atividade econômica é a agropecuária, juntamente com a agricultura familiar, onde predomina a produção de alimentos em áreas sem irrigação.

4.2. Etapas Metodológicas do estudo

As etapas foram realizadas da seguinte forma: I) Aquisição e processamento do Modelo Digital de Elevação (MDE) da área de estudo para a caracterização morfométrica no QGIS e HEC-HMS; II) Aquisição dos dados CHIRPS no Google Earth Engine (GEE) para determinação dos anos extremos no período de 1993 a 2022 (30 anos) por meio da Técnica de *Quantis*; III) Aquisição e processamento dos produtos MODIS no GEE para determinação do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), Índice de Vegetação do Solo (SAVI), Índice de Área Foliar (IAF), Índice de Água por Diferença Normalizada (NDWI), Evapotranspiração real (ET_r), Evapotranspiração potencial (ETP) e temperatura da superfície para o período de 2000 a 2021 e IV). Avaliação do uso e cobertura da terra no período de 2000 a 2021. Foram analisadas imagens com intervalos de três anos (2000, 2003, 2006, 2009, 2012, 2015, 2018 e 2021) e a série histórica do período de estudo. A Figura 3 apresenta o fluxograma das etapas metodológicas.

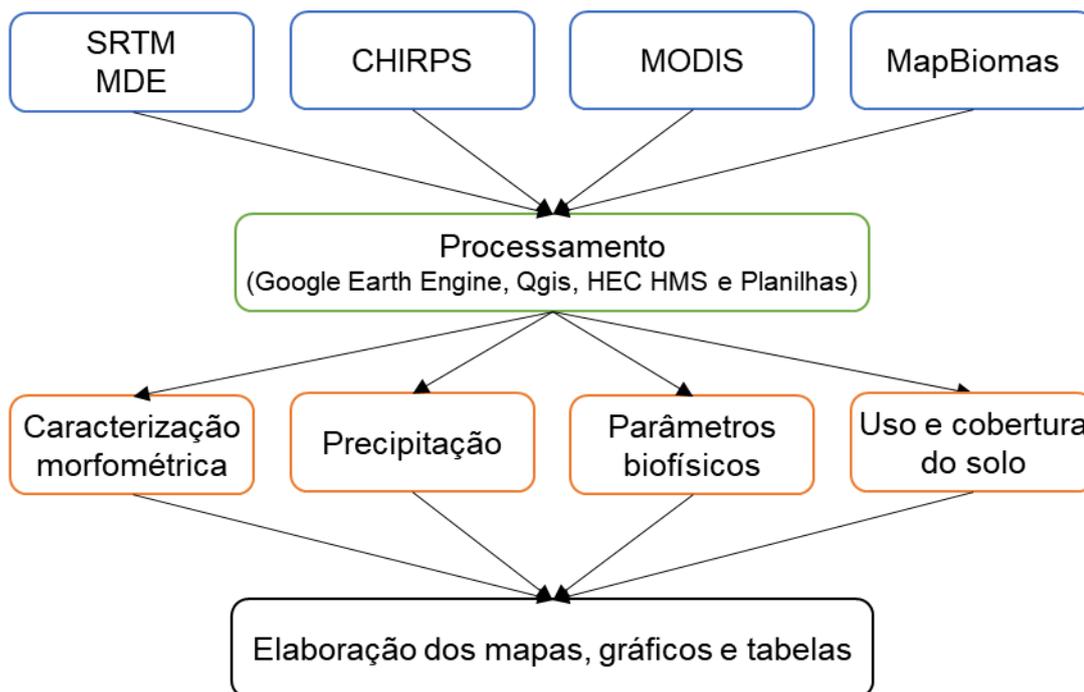


Figura 3. Fluxograma das etapas metodológicas do projeto.

4.3. Dados meteorológicos

Os dados de precipitação pluvial (em mm) foram obtidos gratuitamente da Agência Nacional das Águas (ANA) através do seguinte link: (<https://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao>). Todos os dados de superfície foram obtidos sem nenhum custo financeiro. Na Tabela 2, encontram-se listadas as coordenadas geográficas das estações meteorológicas com 30 anos de dados observados.

Tabela 2. Lista das estações meteorológicas na área de estudo.

Município	Domínio	Localização: Lat; Long (°)	Altitude (m)
Canapi - AL	DNOCS	-9,18; -37,43	280
Mata Grande - AL	INMET	-9,13; -37,72	635
Pão de Açúcar - AL	ANA	-9,75; -37,43	21
Piranhas – AL	ANA	-9,63; -37,76	130

m que: Lat é a latitude em graus; Long é a longitude em graus; Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS) e Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

4.4. Dados Orbitais

4.4.1. Modelo Digital de Elevação (MDE)

Para a caracterização morfométrica da bacia do rio Capiá, foi utilizado um Modelo Digital de Elevação (MDE) obtido a partir do satélite *ALOS PALSAR*, com resolução espacial de 12,5m. O MDE está disponibilizado para acesso no site: <https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>.

4.4.2. Produtos do Sensor MODIS

A fim de analisar a série histórica e intervalos a cada três anos no período de 2000 a 2021 (totalizando oito imagens anuais) dos parâmetros biofísicos da bacia do rio Capiá, foram adquiridos produtos do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) presentes nas plataformas orbitais TERRA e AQUA, referentes aos anos de 2000 a 2021. Os produtos do sensor MODIS estão disponíveis na plataforma digital *Google Earth Engine* (GEE) (<https://code.earthengine.google.com/>).

Para o NDVI, foi utilizado o produto MOD13Q1.061, e as imagens são produzidas a cada 16 dias com resolução espacial de 250 m (Didan, 2021). O produto MOD11A1.061 forneceu dados diários de temperatura da superfície terrestre (Ts) com resolução de 1000 m (Wan, Hook, Hulley, 2021). O produto MOD16A2.061 forneceu imagens com intervalos de 8 dias de Evapotranspiração real e potencial, com resolução de 500 m (Running; Um; Zhao, 2021). As bandas de refletância “sur_refl_b02” e “sur_refl_b07” do produto MOD09A1.061 foram utilizadas para obtenção do NDWI, produzidas a cada 8 dias com resolução espacial de 500 m (Vermote, 2021). As bandas de refletância “sur_refl_b01” e “sur_refl_b02” do produto MOD13Q1.061 foram utilizadas para obtenção do SAVI e IAF, produzidas a cada 16 dias com resolução espacial de 250 m (Didan, 2021).

4.4.3. CHIRPS

O CHIRPS é uma base de dados de precipitação desenvolvida pelo *United States Geological Survey* (USGS) e pelo *Climate Hazards Group at the University of California, Santa Barbara* (UCSB) (Silva *et al.*, 2020; Costa *et al.*, 2019). O produto CHIRPS tem uma resolução espacial de 0,05°, o que equivale a aproximadamente 5

km, e abrange uma área geográfica de 50° S a 50° N. A base de dados abrange o período de 1981 até os dias atuais, com dados diários e mensais (Rabelo *et al.*, 2022; Funk *et al.*, 2015). Os dados do CHIRPS foram utilizados para determinar os anos extremos (Muito seco, Seco, Normal, Chuvoso e Muito chuvoso) usando a técnica de Quantis em um período de 30 anos, de 1993 a 2022.

4.5. Processamento

4.5.1. Técnica de Quantis

A obtenção e processamento dos dados do produto CHIRPS foram realizados na plataforma digital GEE para determinar os anos extremos de precipitação utilizando a Técnica de Quantis, conforme proposto por Pinkayan (1966).

A precipitação total anual no período de 1993 a 2022 foi ordenada da seguinte forma: $P_1 \leq P_2 \leq P_3 \leq \dots \leq P_{30}$, em que P representa a precipitação total anual.

Com base nessa ordenação, podemos classificar os anos da seguinte forma: Muito seco: se para aquele ano $P \leq Q_1$; Seco: se para aquele ano $Q_1 < P \leq Q_2$; Normal: se para aquele ano $Q_2 < P \leq Q_3$; Chuvoso: se para aquele ano $Q_3 < P \leq Q_4$; Muito chuvoso: se para aquele ano $Q_4 < P$. Os valores de Q_1 , Q_2 , Q_3 e Q_4 correspondem aos quantis de 0,15, 0,35, 0,65 e 0,85 (Tabela 3), respectivamente.

As equações 6, 7, 8 e 9 representam a ordem quantificada, em que os anos foram agrupados de acordo com a precipitação pluvial. Os anos com precipitação menor ou igual à média das precipitações dos anos 4 e 5 (0,15) foram classificados como muito seco. Os anos com precipitação entre os quantis Q_1 e Q_2 foram classificados em Seco. Os anos com precipitação entre os quantis Q_2 e Q_3 foram classificados em Normal; os anos com precipitação entre Q_3 e Q_4 foram classificados como chuvoso. Por fim, os anos com precipitação maior que Q_4 foram classificados como Muito Chuvoso.

$$Q_1 = \frac{1}{2} (P_4 + P_5) \quad (6)$$

$$Q_2 = \frac{1}{2} (P_{10} + P_{11}) \quad (7)$$

$$Q_3 = \frac{1}{2} (P_{19} + P_{20}) \quad (8)$$

$$Q_4 = \frac{1}{2} (P_{25} + P_{26}) \quad (9)$$

A Tabela 3 mostra a classificação dos anos em relação aos intervalos dos quantis.

Tabela 3. Classificação para os regimes pluviométricos.

Classificação	Intervalos
Muito seco	$P \leq Q_{1(0,15)}$
Seco	$Q_{1(0,15)} < P \leq Q_{2(0,35)}$
Normal	$Q_{2(0,35)} < P \leq Q_{3(0,65)}$
Chuvoso	$Q_{3(0,65)} < P \leq Q_{4(0,85)}$
Muito chuvoso	$Q_{4(0,85)} < P$

Fonte: Pinkayan (1966)

A classificação dos anos em muito seco, seco, normal, chuvoso e muito chuvoso foi fundamental para embasar as discussões sobre os parâmetros biofísicos.

4.5.2. Características morfométricas

Para refinar os resultados, a bacia hidrográfica foi dividida em três sub-bacias utilizando o software HEC-HMS (HEC, 2022). Em seguida, cada sub-bacia passou por uma caracterização morfométrica utilizando o software Qgis, a fim de subsidiar a análise dos parâmetros biofísicos.

As características geométricas das sub-bacias incluem o coeficiente de compacidade, fator de forma, índice de circularidade e razão de alongação.

O coeficiente de compacidade (K_c), conforme explicado por Villela e Mattos (1975), é calculado pela Equação 10, que relaciona o perímetro da sub-bacia com a área de um círculo de mesmo perímetro.

$$K_c = 0,28 * \frac{P}{A^{0,5}} \quad (10)$$

em que: P é o perímetro (km) e A é a área da sub-bacia (km²). Esse coeficiente revela a suscetibilidade de ocorrência de enchentes nas áreas mais baixas da sub-bacia. Sempre possui um valor maior que 1 e valores mais próximos da unidade indicam maior propensão a enchentes.

O fator de forma (Kf) é a relação entre a área da sub-bacia e o comprimento do eixo da sub-bacia, sendo sempre menor que 1. Sub-bacias com valores menores de fator de forma são mais alongadas e apresentam menor susceptibilidade a inundações, pois é improvável que toda a área da sub-bacia seja coberta em caso de chuvas intensas. O fator de forma foi calculado pela Equação 11 (Villela; Mattos, 1975).

$$Kf = \frac{A}{L^2} \quad (11)$$

em que: L é o comprimento do eixo da sub-bacia (km).

Cardoso *et al.* (2006) mencionam que juntamente com Kc, o índice de circularidade se aproxima de 1 quando a sub-bacia se torna mais circular e diminui quando ela se torna mais alongada. Este índice é calculado dividindo-se a área total da sub-bacia pela área de um círculo com o mesmo perímetro da sub-bacia em questão. A Equação 12 (MÜLLER, 1953) foi usada para realizar esse cálculo.

$$Ic = \frac{12,5 * A}{P^2} \quad (12)$$

em que, Ic é o índice de circularidade (adimensional).

A razão de alongação é definida como a relação entre os índices área da sub-bacia (A) e o comprimento do eixo da sub-bacia (L), e é um índice utilizado para determinar o formato da sub-bacia. Quanto maior o valor da razão de alongação, mais próxima a sub-bacia é de um círculo, o que indica uma maior propensão à ocorrência de enchentes. Essa razão pode ser calculada utilizando-se a Equação 13 proposta por Schumm em 1963.

$$Re = 1,128 \frac{A^{0,5}}{L} \quad (13)$$

em que: Re é a razão de alongação (adimensional).

As características hidrográficas incluem a densidade de drenagem, densidade hidrográfica, extensão média do escoamento superficial, índice de sinuosidade do rio principal e razão de textura.

A densidade da rede de drenagem é a relação entre o comprimento total dos canais da rede (perenes e intermitentes) e a área da sub-bacia, conforme a Equação 14 (Horton, 1945).

$$Dd = \frac{Rd}{A} \quad (14)$$

em que: Dd é a densidade de drenagem (km km^{-2}), Rd é o comprimento da rede de drenagem (km).

A densidade hidrográfica, também conhecida como frequência de canais ou densidade de rios, corresponde à relação entre o número de segmentos de rios e a área da sub-bacia. Ela indica a quantidade de nascentes na sub-bacia e pode ser calculada usando a Equação 15 de Christofolletti (1974).

$$Dh = \frac{N}{A} \quad (15)$$

em que: Dh é a densidade hidrográfica (rios km^{-2}) e N o número de seguimentos de rios.

O índice de sinuosidade (Equação 16) é calculado dividindo-se o comprimento do canal principal pela distância vetorial entre seus extremos (Villela; Mattos, 1975).

$$Is = 100 \frac{R - L_{rp}}{R} \quad (16)$$

em que: Is é o índice de sinuosidade (%); R é o comprimento do rio principal (km); L_{rp} é o comprimento do talvegue do rio principal (km). Segundo Crhistofolletti (1981), o índice de sinuosidade poder ser classificado conforme mostrado na Tabela 4.

Tabela 4. Classificação para índice de sinuosidade.

índice de sinuosidade (Is)	Classificação
< 20%	Canal muito reto
20% ≤ Is ≤ 30%	Canal reto
30% ≤ Is ≤ 40%	Canal divagante
40% ≤ Is ≤ 50%	Canal sinuoso
Is ≥ 50%	Canal muito sinuoso

Fonte: Crhistofletti (1981)

A extensão média do escoamento superficial foi obtida como a relação entre a área da sub-bacia e o comprimento da rede de drenagem. Ela é definida como a distância média que a água da chuva teria que percorrer sobre o terreno da sub-bacia até chegar a um curso d'água qualquer. A Equação 17, proposta por Villela e Mattos em 1975, fornece essa estimativa.

$$Lm = \frac{A}{4 * Rd} \quad (17)$$

em que: Lm é a extensão média do escoamento superficial (km); Rd é o comprimento da rede de drenagem (km).

A sinuosidade do rio principal é representada pela relação entre o comprimento do rio principal e o comprimento da sua linha de referência, conhecida como talvegue, como apresentado na Equação 18 (Schumm,1963):

$$Srp = \frac{R}{Lrp} \quad (18)$$

em que: Srp é a sinuosidade do rio principal (adimensional).

A Tabela 5 contém a classificação para a sinuosidade do rio principal.

Tabela 5. Classificação para sinuosidade do rio principal.

Tipos	Valor do índice
1 Meandrantos	
1.1 Tortuoso	2,3
1.2 Irregulares	1,8
1.3 Meandros regulares	1,7
2 Transicional	1,3
3 Retos	1,1

Fonte: Schumm (1963)

A razão de textura, também conhecida como relação entre o número de segmentos de rios e o perímetro da sub-bacia, pode ser calculada utilizando a seguinte Equação 19 (Smith, 1950):

$$Rt = \frac{N}{P} \quad (19)$$

em que: T é a razão de textura (km); N é o número do seguimento de rios.

As características do relevo foram determinadas de acordo com os seguintes parâmetros: declividade do rio principal, índice de rugosidade e razão de relevo. Para calcular a declividade do leito ou rio principal, analisamos a relação entre a diferença de altitude e o comprimento horizontal do curso d'água, conforme a Equação 20 (Villela; Mattos, 1975):

$$S1 = \frac{(Cota_{max} - Cota_{min})}{Lrp} \quad (20)$$

em que: S1 é a declividade de álveo ($m \cdot m^{-1}$), $cota_{max}$ e $cota_{min}$ são os pontos mais alto e o mais baixa do rio principal, respectivamente (m).

O Índice de Rugosidade foi calculado multiplicando-se a amplitude altimétrica pela densidade de drenagem, conforme a Equação 21 (Christofolletti, 1980):

$$Ir = \Delta a * Dd \quad (21)$$

em que: Ir é o índice de rugosidade (adimensional) e Δa é a amplitude altimétrica (km).

A razão de relevo é uma medida da relação entre a variação altimétrica e o comprimento da sub-bacia, e pode ser calculada usando a Equação 22 (Christofolletti, 1980).

$$Rr = \frac{\Delta a}{L} \quad (22)$$

em que: Rr a razão de relevo (m m⁻¹)

4.5.3. Parâmetros biofísicos

As imagens do sensor MODIS foram todas obtidas e processadas na plataforma digital GEE. Para isso, foram utilizados scripts em linguagem Javascript para a elaboração dos cálculos dos parâmetros NDVI, SAVI, IAF, NDWI, ETr, ETP e Temperatura da superfície da série temporal, referente aos anos de 2000 a 2022.

O índice de vegetação da diferença normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index* – NDVI) é um indicador da vegetação verde, cujos valores variam de -1 a +1. Para a representação do NDVI no intervalo -1 a +1, as imagens do produto MODIS foram corrigidas por um fator de escala de 0,0001 (Didan, 2021)

O índice de vegetação ajustado ao solo (*Soil Adjusted Vegetation Index* – SAVI) utiliza um fator de ajuste para minimizar o efeito do solo sobre a vegetação. Este fator de ajuste depende do tipo de solo, e para o presente estudo foi utilizado um fator de ajuste de 0,5 (L), considerando a vegetação da área como caatinga (Silva; Galvíncio, 2012). A Equação 23 foi utilizada para a elaboração do SAVI (Huete, 1988):

$$SAVI = \left[\frac{NIR - R}{NIR + R + L} \right] * (1 + L) \quad (23)$$

em que: NIR é a refletância do Infravermelho Próximo, centrada em 858 nm, representado pela banda 2 do sensor MODIS, e R é a refletância do vermelho, centrada em 645 nm, representando a banda 1 do sensor MODIS.

O índice de área foliar (IAF) é um parâmetro biofísico que utiliza o SAVI e é definido como a razão entre a área total das folhas e a área do solo ocupada por essa vegetação. Ele é um indicador da biomassa e da resistência do dossel. O cálculo do IAF foi realizado pela Equação 25 desenvolvida por Allen *et al.* (2002).

$$IAF = \frac{-\ln\left(\frac{0,69 - SAVI}{0,59}\right)}{0,91} \quad (24)$$

O índice de vegetação da diferença normalizada da água (NDWI), proposto por McFeeters (1996), é utilizado para discriminar ambientes com água exposta. O mesmo pode ser expresso pela equação 25, de acordo com Gao (1996):

$$NDWI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} \quad (25)$$

em que: SWIR é a refletância do infravermelho médio (2105 - 2155 nm) que é a banda 7 do sensor do MODIS (Baig *et al.*, 2013). Áreas com $NDWI \geq 0$ indicam presença de água. Áreas com $NDWI \leq 0$ indicam áreas urbanas e vegetação.

As imagens do produto que fornecem o valor de Temperatura da superfície foram multiplicadas por um fator de escala de 0,02, resultando em imagens na unidade Kelvin (K), que foram posteriormente convertidas para graus Celsius (°C).

As imagens dos produtos que fornecem ETr e ETP serão multiplicadas por um fator de escala de 0,1, obtendo, desse modo, imagens em $mm \text{ dia}^{-1}$.

4.5.4. Uso e cobertura da terra

Para a avaliação das mudanças no uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica, foram utilizados mapas temáticos do MapBiomas para os anos correspondentes a cada classificação pluviométrica. Utilizando as informações sobre o uso e cobertura da terra fornecidas pelo MapBiomas (conforme mostrado na Tabela 6), foi possível analisar a influência dessas mudanças nos parâmetros biofísicos e nas características morfométrica da bacia.

Tabela 6. Classificação para uso e cobertura da terra segundo o MapBiomas.

Classes	Descrição
1. Caatinga	Formação Florestal e Formação Savânica
2. Agropecuária	Pastagem, Agricultura e Silvicultura
3. Área urbanizada	Área Urbanizada, Mineração e Outras Áreas não Vegetadas
4. Corpo D`água	Rio, Lago, Oceano e Aquicultura
5. Outras Áreas não Vegetadas	Áreas de superfícies não permeáveis (infraestrutura, expansão urbana ou mineração) não mapeadas em suas classes

Fonte: MapBiomas, adaptado pelo autor.

As imagens utilizadas no mapeamento do projeto MapBiomias durante o período em estudo foram adquiridas e processadas na plataforma *Google Earth Engine* e QGIS.

4.6. Análise estatística

Para a avaliação dos resultados dos índices biofísicos, morfométricos, hidrológicos, topográficos e cobertura vegetal nas oito imagens, utilizamos a estatística descritiva. Calculamos a média como medida de tendência central, além das medidas de dispersão como valores máximos e mínimos, desvio padrão (DP) e o coeficiente de variação (CV).

Para avaliar a tendência espaço-temporal dos índices biofísicos ao longo dos 22 anos (de 2000 a 2021), foi aplicado o teste não-paramétrico de Mann-Kendall (MAN, 1945; KENDALL, 1975). Este teste, recomendado pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) para a análise da tendência em séries temporais de dados ambientais, é amplamente utilizado para avaliar tendência em séries de longo prazo com dados não normais (Lopes; Silva, 2013; Dagnachew *et al.*, 2020).

O teste de significância de Mann-Kendall é dado por (Equação 26):

$$S = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \text{sgn}(x_j - x_i) \text{ em que, } \text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1 & \text{se } x_j > x_i \\ 0 & \text{se } x_j = x_i \\ -1 & \text{se } x_j < x_i \end{cases} \quad (26)$$

em que: x_i e x_j são os dados ou amostras estimadas da sequência de valores e N é o comprimento da série ou o total acumulado de amostras. Para variável aleatória independente distribuída sem tendências de média (Equação 27) e a variância de S (Equação 28) são dadas por:

$$M(S) = 0 \quad (27)$$

$$\text{Var}(S) = \frac{N(N-1)(2N+5) - \sum_{i=1}^N t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18} \quad (28)$$

em que: t_i é o número de observações com empates dentro do grupo de amostras i .

Os valores padronizados do teste estatístico (Z) serão calculados a partir da Equação 29:

$$Z = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{se } S > 0 \\ 0 & \text{se } S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{se } S < 0 \end{cases} \quad (29)$$

Valores positivos de Z indicam uma tendência crescente, enquanto valores negativos de Z indicam uma tendência decrescente. O limiar dos resultados Z utilizados para testar a significância foi de 1,96 com nível de significância de 95% ($\alpha = 0,05$) e 2,57 com nível de significância de 99% ($\alpha = 0,01$) ao longo do tempo. Isso fornece tanto a direção quanto a significância da tendência (Huang; Kong, 2016; Santos *et al.*, 2020)

O teste de Mann-Kendall não fornece estimativa da magnitude da tendência. Portanto, para quantificar a amplitude das tendências espaço-temporais das variáveis biofísicas avaliadas neste estudo, utilizamos o teste não-paramétrico de Theil-Sen, também conhecido como estimador de inclinação de Sen. Esse teste é uma estimativa estatística não paramétrica robusta da magnitude da tendência e é importante para determinar a taxa de variação de parâmetros em séries temporais. Geralmente, ele é usado em conjunto com o Teste de Mann-Kendall (Dagnachew *et al.*, 2020; Tilgenkamp, 2022). Esse teste simplesmente calcula todas as linhas entre cada par de pontos e usa a mediana das inclinações dessas linhas. Ele foi proposto por Theil (1950) e posteriormente estendido por Sen (1968) (Equação 30):

$$\beta_n = \left\{ b_{ij} : b_{ij} = \frac{x_j - x_i}{t_j - t_i}, \text{ se } t_i \neq t_j, 1 \leq i < j \leq n \right\} \quad (30)$$

em que: x_i e x_j são os valores da série temporal no tempo t_i e t_j , respectivamente; e n é conjunto de valores. Logo, o estimador Theil-Sen é definido como a mediana de todas as inclinações em β_n (Peng *et al.*, 2017).

5. Resultados e Discussão

5.1. Morfometria

A Figura 4 ilustra as sub-bacias e a distribuição do sistema de drenagem na bacia hidrográfica do rio Capiá. As sub-bacias foram geradas com base nas bifurcações do rio principal, com a junção no centro da bacia, conectando todo o sistema de drenagem e com exultório no rio São Francisco.

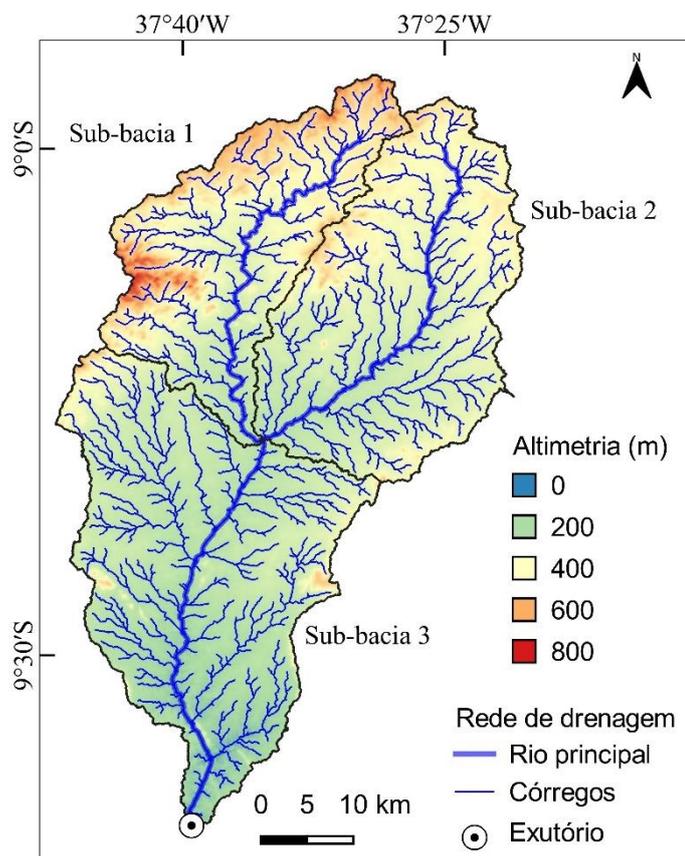


Figura 4. Divisão da bacia hidrográfica do rio Capiá em Sub-bacias e a distribuição da rede de drenagem.

As características referentes à forma da bacia estão descritas na Tabela 7. Cada sub-bacia apresentou diferentes formatos. O perímetro, a área e o comprimento do eixo da sub-bacia são informações fundamentais para a determinação das demais características. De acordo com Villela e Mattos (1975), quanto mais circular for uma bacia (K_c mais próximo de 1), maior será a propensão a enchentes. Portanto, as sub-bacias apresentam baixa propensão a enchentes, uma vez que seus valores estão acima de 2. O mesmo padrão foi observado na bacia como um todo, que apresentou um K_c de 2,275. Um resultado semelhante foi encontrado por Souza et al. (2021) ao

estudar a bacia do Riacho do Navio em Pernambuco, onde o K_c foi calculado como 2,10.

Assim como o K_c , o K_f é um indicativo de enchentes. As sub-bacias 1, 2 e 3 apresentaram valores de K_f de 0,339, 0,442 e 0,336, respectivamente, o que indica uma baixa probabilidade de enchentes nessas regiões da bacia, em comparação com outra bacia de área semelhante com um K_f maior. Em um estudo realizado por Souza et al. (2021), foi encontrado um valor de 0,29 para bacia Ribeirão Lajeado, em São Paulo, enquanto Hirata e Burkert (2020) encontraram um valor de 0,328. Ao compararmos a sub-bacia 2 do presente estudo com a bacia do Riacho da Navio, observamos que a área desta bacia é 4 vezes maior, porém, o comprimento do eixo da bacia é apenas 2,5 vezes maior, o que comprova um menor valor de K_f para a bacia do Riacho do Navio.

O Índice de circularidade é um indicativo e quão próxima uma bacia se aproxima de uma forma circular. Quanto mais circular for a bacia, maior será a propensão a enchentes no rio principal da mesma (Silva et al., 2016). Da mesma forma, a Razão de alongação nas sub-bacias e, de modo geral, na bacia indica baixa probabilidade de ocorrência de enchentes.

Tabela 7. Características geométricas da bacia hidrográfica do rio Capiá.

Características Geométricas	Sub-bacia			Bacia
	1	2	3	
Perímetro (km)	210,850	218,625	252,025	393,025
Área (km ²)	590,271	798,266	952,102	2340,734
Comprimento do eixo da sub-bacia (km)	41,757	42,483	53,197	84,314
Coeficiente de compacidade (K_c)	2,430	2,167	2,287	2,275
Fator de forma (K_f)	0,339	0,442	0,336	0,329
Índice de circularidade (I_c)	0,166	0,209	0,187	0,189
Razão de alongação (R_e)	0,656	0,750	0,654	0,647

As características hidrográficas (Tabela 8) da bacia são informações importantes, pois tratam da capacidade de drenagem da área. Os índices R_d , N , R e L_{rp} são fundamentais para determinação da hidrografia da bacia.

A densidade de drenagem é influenciada pelo clima, vegetação, litologia e outras características da bacia. Além disso, afeta o escoamento e o transporte de sedimento (Christofolletti, 1980). Segundo a classificação de Villela e Mattos (1975), a bacia

possui densidade regular, estando dentro do limite inferior e superior. A Dd pode ser considerada homogênea, pois não apresenta diferenças discrepantes entre as sub-bacias. De acordo com Dornellas et al. (2020), esses valores são típicos de regiões semiáridas e refletem o baixo grau de dissecação do relevo.

Os cursos fluviais desempenham um papel crucial na modelação da superfície terrestre, sendo considerados um dos principais agentes nesse processo (Panta; Nascimento; Monteiro, 2022).

A densidade hidrográfica da região revelou que, em média, existe 0,5 segmento de rio por km², indicando um ambiente com déficit de drenagem e pouca probabilidade de ocorrência de cursos fluviais (Silva et al., 2017).

Ao analisar o índice de sinuosidade do rio principal, observou-se uma variação de acordo com a sub-bacia. Segundo a classificação de Christofletti (1981), as sub-bacias 2 e 3 apresentam um comportamento retilíneo, enquanto a sub-bacia 3 é considerada divagante. No entanto, em escala de toda a bacia, o rio principal é classificado como altamente sinuoso. Essa sinuosidade segue a mesma proporção do Índice de Sinuosidade (Is) e, de acordo com a classificação de Schumm (1963), as sub-bacias 2 e 3 são consideradas transicionais, enquanto a sub-bacia 1 apresenta um padrão de meandro regular. Por outro lado, o rio que percorre toda a bacia é caracterizado como tortuoso.

A extensão média do escoamento superficial apresentou resultados semelhantes em todas as sub-bacias, o que significa que, em qualquer lugar da bacia, a água percorre em média aproximadamente 0,31 km até chegar a um curso d'água.

Existe uma relação inversa entre a Dd (distância de drenagem) e Lm (distância média) - quanto maior for a presença de cursos d'água, menor será a distância percorrida pela água até chegar a um curso d'água (Hirata; Burket, 2020). Segundo Olszewski et al. (2011), distâncias médias pequenas podem resultar em alagamentos durante chuvas intensas, pois a água não teria tempo suficiente para infiltrar no solo.

A Razão de textura não apresentou variação significativa entre as sub-bacias, mas, em geral, a bacia apresentou um valor mais elevado (3,020 km⁻¹). Segundo a classificação proposta por França (1968), as sub-bacias 1, 2 e 3 são classificadas como groseira e a bacia como média.

Tabela 8. Características Hidrográficas da bacia do rio Capiá.

Características Hidrográficas	Sub-bacia			Bacia
	1	2	3	
Comprimento da rede de drenagem (Rd)	468,166	630,820	764,022	1863,008
Número de seguimento de rios (N)	323	399	465	1187
Comprimento do rio principal (R) (Km)	57,180	52,172	53,523	162,875
Comprimento do talvegue do rio principal (Lrp) (Km)	34,559	37,412	42,815	78,879
Densidade de drenagem (Dd) (km km ⁻²)	0,793	0,790	0,802	0,796
Densidade hidrográfica (Dh) (km ⁻²)	0,547	0,500	0,488	0,507
Índice de sinuosidade do rio principal (Is) (%)	39,561	28,291	20,006	51,571
Extensão média do escoamento superficial (Lm) (km)	0,315	0,316	0,312	0,314
Sinuosidade do rio principal (Srp)	1,655	1,395	1,250	2,065
Razão de textura (Rt) (km ⁻¹)	1,532	1,825	1,845	3,020

As características de relevo estão descritas na Tabela 9. A cota máxima e mínima do rio principal referem-se ao ponto mais alto e mais baixo, respectivamente, do rio, da mesma forma é em relação à bacia. Esse parâmetro é importante para zoneamentos climáticos, pois influencia a temperatura e a precipitação pluvial, havendo uma relação de proporcionalidade (Fritzsons; Eduardo Mantovani; Silveira Wrege, 2016; Marinho et al., 2021). Por exemplo, Fritzsons et al. (2016) estimaram uma relação de 0,47°C para cada 100 metros de altitude no mês de janeiro para o estado de Santa Catarina. No entanto, é necessário realizar estudos locais para determinar essa taxa em diferentes regiões, uma vez que o clima pode ser diferente.

A velocidade de escoamento de um rio depende da sua declividade, o que pode influenciar na ocorrência de enchentes. De modo geral, a sub-bacia S1 apresentou valor de 0,005 km km⁻¹. O índice de rugosidade pode indicar as chances de ocorrência de enchentes e está diretamente associando à densidade de drenagem. As sub-bacias 1 e 2 apresentaram valores menores em relação a bacia 3, e, de maneira geral, a bacia apresentou valor mais elevado (0,628) (Tabela 9). Souza et al. (2021) encontraram valor de 0,38 para a bacia do Riacho do Navio, levando em consideração que a amplitude altimétrica da bacia em estudo é semelhante à da bacia citada, a densidade de drenagem do presente estudo é maior.

A razão de relevo mostra o desnível entre a cabeceira e a foz, e quanto maior essa razão de relevo, maior será a quantidade de água escoando superficialmente. Segundo a classificação de Rossi e Pfeifer (1999), a razão de relevo é considerada baixa para as sub-bacias e a bacia.

Tabela 9. Características de relevo da bacia hidrográfica do rio Capiá.

Características de Relevo	Sub-bacia			Bacia
	1	2	3	
Cota máxima do rio principal (m)	419	381	231	381
Cota mínima do rio principal (m)	234	232	6	6
Cota máxima da bacia (m)	787	741	666	793
Cota mínima da bacia (m)	234	232	6	4
Declividade do rio principal (S1) (km km ⁻¹)	0,005	0,004	0,005	0,005
Índice de rugosidade (Ir)	0,439	0,402	0,530	0,628
Razão de relevo (Rr)	0,013	0,012	0,012	0,009

O sistema de drenagem, considerando a classificação de Strahler (1957), é de sexta ordem (Figura 5a). No entanto, a análise separada por sub-bacia modifica a ordem do rio principal, pois as sub-bacias foram geradas a partir da bifurcação do rio principal com exultório na sub-bacia 3 (Figura 4). Portanto, as sub-bacias 1 e 2 são classificadas como ordem 5.

A Figura 5b mostra o mapa de declividade da bacia e a Tabela 10 apresenta as classes de declividade correspondentes. A declividade máxima observada foi de 120,83% (50,39°), enquanto a média ficou em 8,36% (4,78°). Dessa forma, a bacia hidrográfica caracteriza-se como predominantemente de relevo plano a ondulado. De acordo com Salis et al. (2020), o conhecimento sobre a distribuição espacial das classes de relevo é relevante para planejamento da área, cumprimento da legislação e a eficiência das práticas de intervenções antrópicas.

A bacia em estudo está localizada entre o Planalto da Borborema, ao norte da bacia, e a Depressão Sertaneja. Essa depressão é caracterizada por um conjunto de terras de baixa elevação, com uma média 250 m (Panta et al., 2022).

A classe predominante de relevo é plano, localizado na Depressão Sertaneja, ocupando 63,95% da área, equivalente a 1497,15 km². No centro da bacia, encontram-se principalmente áreas de relevo plano, enquanto na região da foz e no noroeste da bacia, o relevo é mais acentuadamente ondulado e montanhoso.

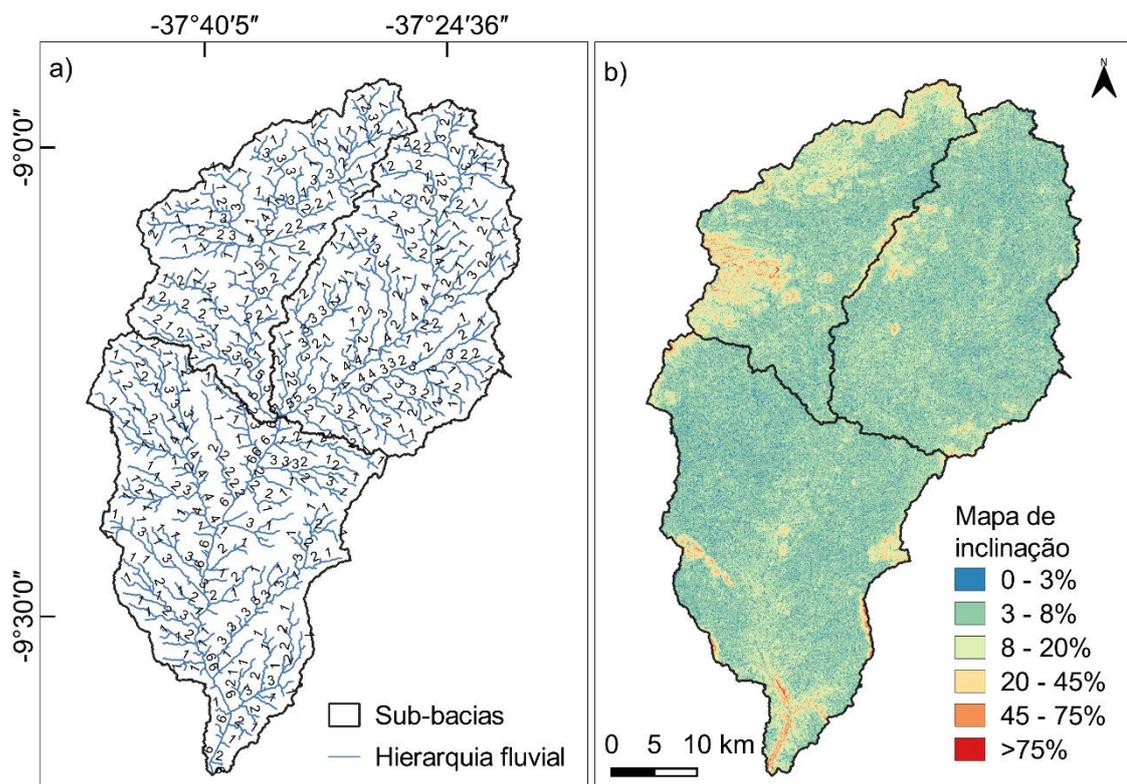


Figura 5. Representação da hierarquia dos cursos d'água segundo o método de Strahler (1957); b) Mapa de inclinação ou declividade do terreno classificado em classes.

Tabela 10. Classes de relevo da bacia hidrográfica Capiá.

Classes de relevo	Declividade (%)	Área (%)	Área (km ²)
Plano	0 - 3	63,95	1497,15
Suave ondulado	3 - 8	12,26	286,94
Ondulado	8 - 20	21,30	498,70
Forte ondulado	20 - 45	2,17	50,88
Montanhoso	45 - 75	0,25	5,77
Escarpado	> 75	0,07	1,55

No noroeste da bacia, sub-bacia 1, encontra-se o Maciço de Mata Grande, localizado na cidade de Mata Grande. Essa região é caracterizada como brejo de altitude, apresentando características climáticas diferente do entorno, sendo classificada como subúmido e com maiores taxas de precipitação pluvial em comparação com as regiões semiáridas vizinhas (Gois et al., 2021; Panta et al., 2022). Conforme ilustrado na Figura 2 e descritos pelos mencionados autores, as altitudes podem ultrapassar mais de 800 metros no Maciço de Mata Grande.

5.2. Validação da precipitação pluvial do CHIRPS

Algumas estatísticas descritivas estão resumidas nos gráficos de caixa (boxplot) abaixo, que comparam os dados de precipitação observados e estimados pelo CHIRPS (Figura 6a). A média anual dos dados observado foi 455 mm, enquanto a média anual dos dados estimados foi 513 mm, mostrando que o CHIRPS superestimou a precipitação pluvial. Ao analisar o maior valor de precipitação pluvial no período de 1992 a 2021, percebeu-se que o CHIRPS se aproximou mais do valor medido em comparação com o menor valor medido.

A Figura 6b exibe as observações de precipitação feitas pela ANA e estimativas de precipitação pelo CHIRPS. A linha pontilhada representa o ajuste de regressão linear, com nível de ajuste de 0,71 e significância ao nível de 1% (Tabela 11), enquanto a linha contínua indica a correspondência 1:1. Essa linha indica se houve superestimação ou subestimação dos dados. Como a reta de regressão está predominantemente acima dessa linha, podemos concluir que os dados de precipitação estimados pelo CHIRPS tendem a ser superestimados. No entanto, é possível deduzir, pelo coeficiente angular (0,79) da reta de regressão, que em valores elevados de precipitação o CHIRPS pode subestimar os resultados. Paredes-Trejo, Barbosa e Lakshmi Kumar (2017), ao estudarem a eficiência do CHIRPS em prever a precipitação no Nordeste brasileiro, também notaram resultados semelhantes, ou seja, tendências de superestimação ou subestimação.

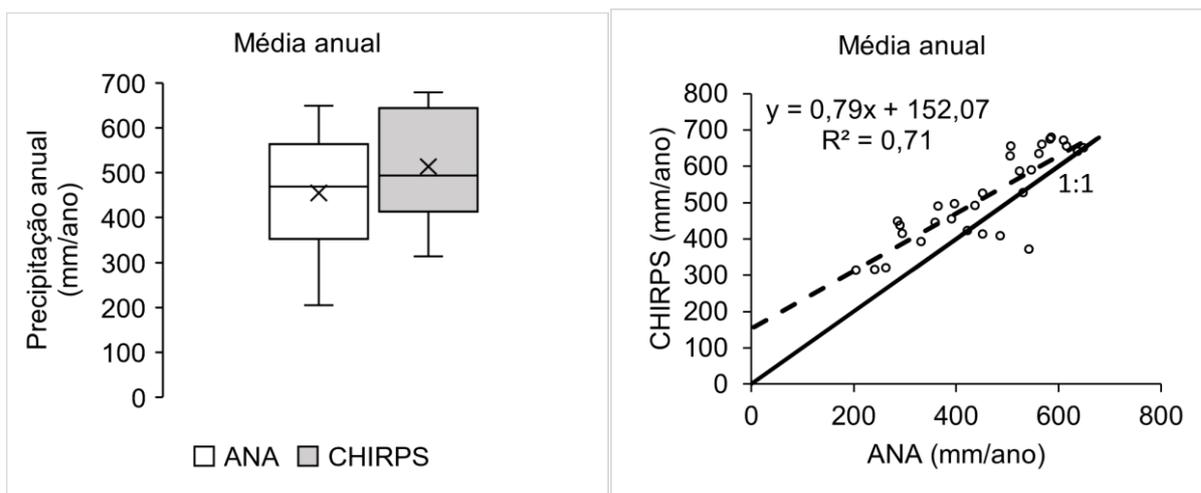


Figura 6. Boxplot (a) e regressão linear com reta 1:1 (b) da média anual de precipitação pluvial (mm).

Tabela 11. Teste de significância da regressão para média anual de precipitação.

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-p</i>
Interseção	152,07	45,18	3,37	< 0,01
ANA	0,79	0,10	8,30	< 0,01

A Figura 7 mostra algumas medidas estatísticas das estações de superfície e dados do CHIRPS para cada localidade analisada representadas por boxplot. Valores discrepantes, outliers, foram encontrados em todas as estações, tanto as estações da ANA quanto o CHIRPS. Com exceção da estação de Mata Grande – AL (Figura 7B), a média, a mediana e valores mínimos foram bem semelhantes entre estações da ANA e o CHIRPS, já os valores máximos, excluindo os outliers, apresentaram variações.

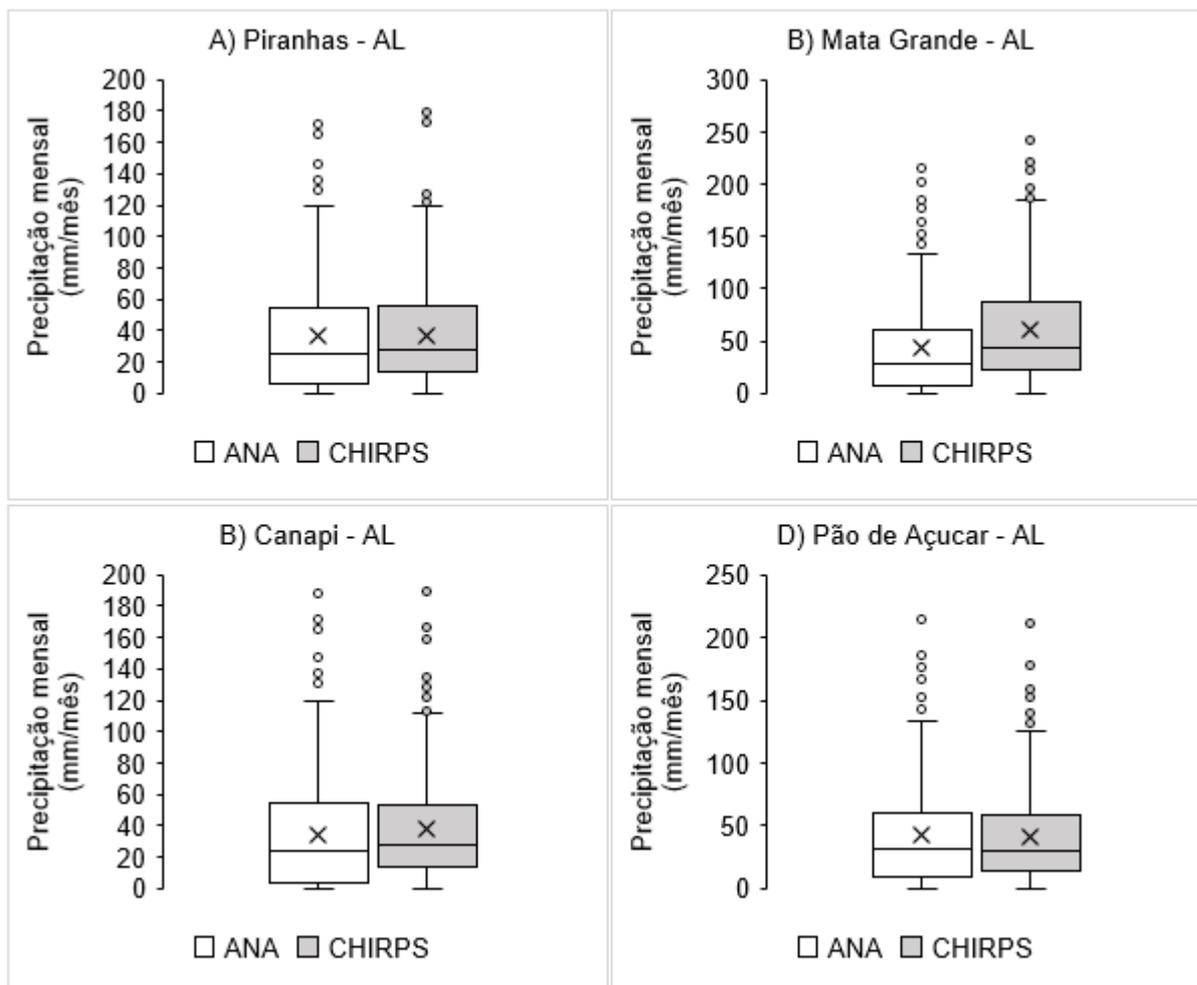


Figura 7. Boxplot sobre os dados de precipitação: A) estação de Piranhas, B) estação de Mata Grande, C) estação de Canapi e D) estação Pão de Açúcar.

A Figura 8 apresenta gráficos de regressão com suas respectivas equações de ajustes e coeficiente de determinação (R^2). Observou-se que a estação de Pão de Açúcar teve o melhor ajuste de regressão linear, com nível de 0,67, sendo também a única estação que mostrou subestimação da precipitação pluvial pelo CHIRPS, conforme apresentado na Tabela 13. No entanto, os valores de R^2 foram considerados razoáveis para todas as estações, como uma explicação dos valores pelo CHIRPS.

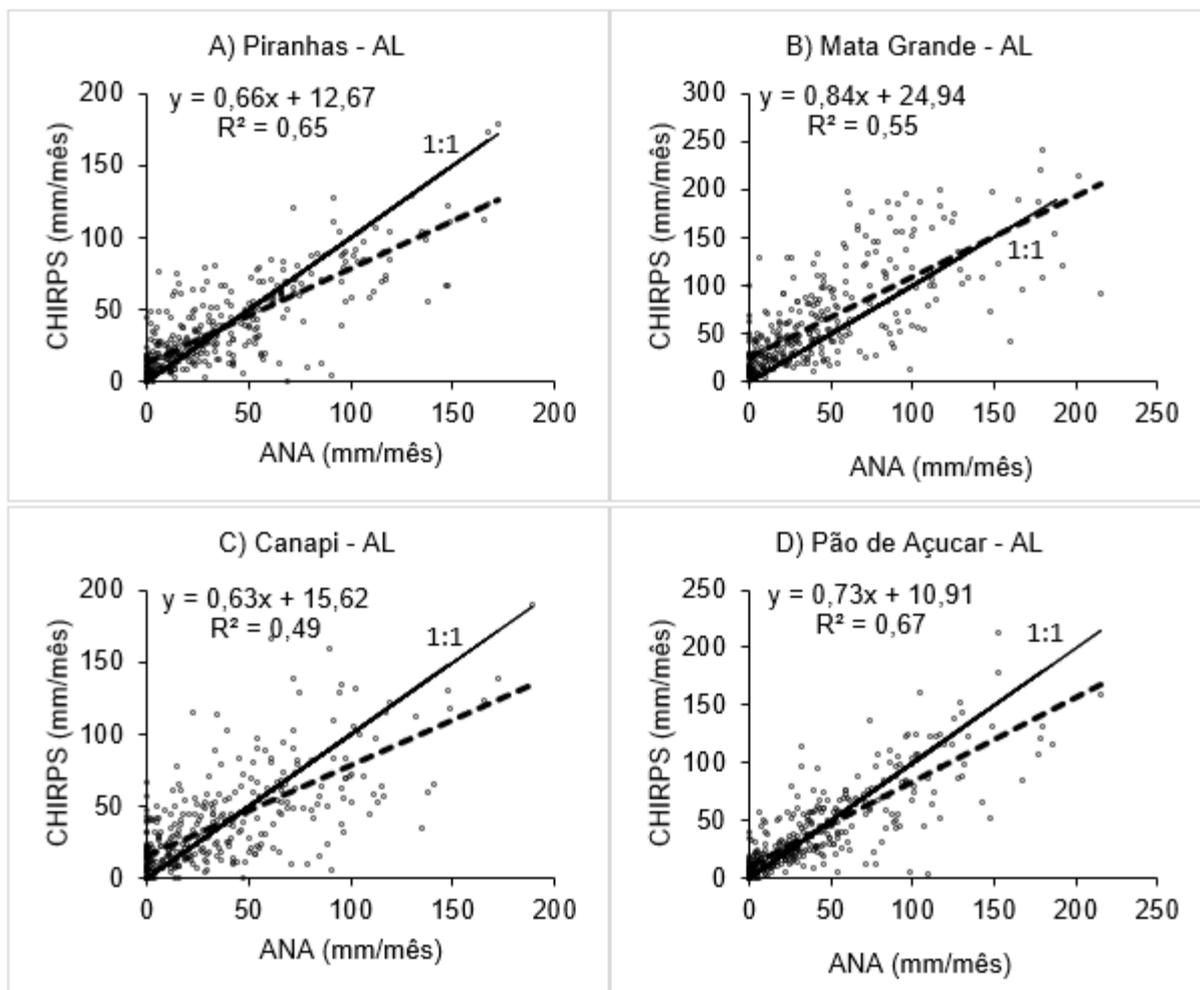


Figura 8. Retas de Regressão e coeficiente de determinação para os dados mensais de precipitação.

A regressão foi significativa ao nível de 1% (valor-p < 0,01) para todas as estações meteorológicas (Tabela 12), ou seja, os modelos (equações) podem ser considerados adequados para realizar previsões pelo CHIRPS.

Tabela 12. Teste de significância da regressão para as estações da ANA.

Piranhas - AL				
	<i>Coeficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-p</i>
Interseção	12,67	1,34	9,47	< 0,01
ANA	0,66	0,03	25,73	< 0,01
Mata Grande - AL				
	<i>Coeficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-p</i>
Interseção	24,94	2,58	9,65	< 0,01
ANA	0,84	0,04	20,23	< 0,01
Canapi - AL				
	<i>Coeficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-p</i>
Interseção	15,62	1,72	9,07	< 0,01
ANA	0,63	0,03	18,40	< 0,01
Pão de Açúcar - AL				
	<i>Coeficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-p</i>
Interseção	10,91	1,58	6,90	< 0,01
ANA	0,73	0,03	27,07	< 0,01

Alguns parâmetros estatísticos dos dados de precipitação pluvial estimados pela CHIRPS em comparação com as estações terrestres da ANA na escala mensal e anual estão apresentados na Tabela 13. O coeficiente de correlação de Pearson (r) variou para cada estação meteorológica, oscilando de 0,70 a 0,82 na escala mensal. Na escala anual, o valor de r foi de 0,84.

O erro médio percentual (EMP) indica se houve superestimação ou subestimação, em termos percentuais, dos dados de precipitação do CHIRPS em relação às estações terrestres. Percebe-se que o CHIRPS superestimou e subestimou algumas dados de precipitação das estações, porém, em escala anual, o CHIRPS superestimou a precipitação em 12,91%, como verificado na Tabela 13.

O Erro Quadrático médio da Raiz (RMSE) verifica a acurácia das estimativas feita pelo CHIRPS em relação aos dados das estações. Erros menores representam melhor ajuste ao valor real. Para a escala anual, o RMSE apresentou valor maior, porém, considerando que os dados trabalhados são de valores altos, pode-se considerar esse erro razoável em comparação aos erros mensais.

O Índice de Concordância (d) apresentou valores entre 0,82 e 0,90. Essas correlações são consideradas aceitáveis e indicam o grau de erro de precisão do modelo.

Tabela 13. Parâmetros estatísticos dos dados de precipitação estimados pelo CHIRPS na escala mensal e anual.

Estações	r	EMP (%)	RMSE	d	Altitude (m)
Piranhas – AL	0,80	0,65	21,97	0,88	130
Mata Grande – AL	0,74	43,28	39,50	0,82	635
Canapi – AL	0,70	7,94	27,19	0,83	280
Pão de Açúcar – AL	0,82	-1,12	23,63	0,90	45
Média Anual	0,84	12,91	90,61	0,86	-

r: Coeficiente de correlação de Pearson; R²: coeficiente de determinação; EMP: erro médio percentual; RMSE: erro quadrado médio da raiz; d: índice de concordância.

O comparativo entre a precipitação mensal das estações terrestres e a estimada pelo CHIRPS é apresentado na Figura 9. De modo geral, o CHIRPS superestima os valores de precipitação, principalmente no primeiro semestre do ano, que é o período de maior volume de chuva na região. Para a estação de Mata Grande, houve maior divergência entre os dados observados e estimados, o fator altitude pode ter contribuídos para essa diferença.

O padrão de comportamento de chuva, ou seja, a distribuição ao longo dos meses, já era esperado, pois é característico do semiárido brasileiro.

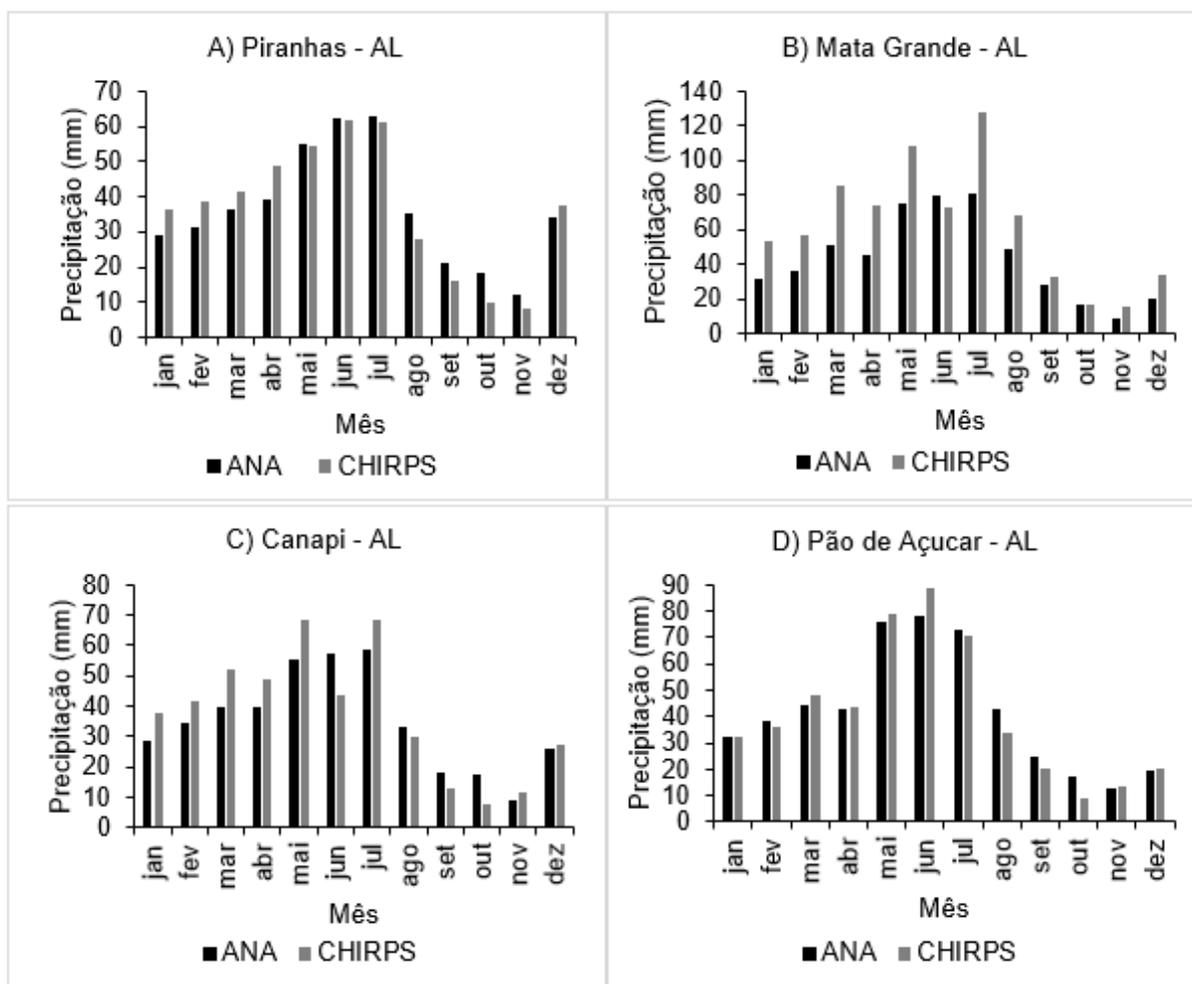


Figura 9. Valores mensais médios de precipitação pluvial de estações terrestres da ANA e estimados pelo CHIRPS.

5.3. Técnica de Quantis

A classificação dos anos, no intervalo de 1992 a 2021, utilizando a técnica de Quantis, está apresentada na Tabela 14. Os dados de precipitação anual foram obtidos do CHIRPS e variaram de 269,24 mm no ano de 2012 para 721,68 mm para o ano de 2005.

Portanto, o ano com a menor precipitação registrada durante o período estudado foi 2012, enquanto o ano de 2005 registrou a maior precipitação. É importante mencionar que, devido ao fato de o CHIRPS superestimar a precipitação, há a possibilidade de esses valores de precipitação sejam menores na realidade. No

entretanto, as análises de regressão mostram que o CHIRPS apresenta previsões aceitáveis, condizentes com os dados observados.

Tabela 14. Classificação dos anos segundo a metodologia proposta por Pincayan (1966)

Classificação	Ano	Precipitação (mm)	Classificação	Ano	Precipitação (mm)
Muito seco	2012	269,24	Chuvoso	2000	599,72
	1998	287,11		2007	601,64
	1993	308,94		2011	609,32
	2021	345,09		1992	615,54
Seco	1999	369,79		2020	625,21
	2003	393,64		2008	626,33
	2015	395,88		2002	636,84
	2017	396,20		2010	667,09
	2016	413,19	Muito chuvoso	1997	705,57
	2018	417,45	2009	706,38	
Normal	2001	428,64	2005	721,68	
	2019	433,86			
	2014	440,77			
	2013	477,29			
	1995	531,08			
	1994	537,30			
	2006	571,11			
	2004	573,40			
	1996	583,14			

5.4. Uso e cobertura da terra

A Figura 10 mostra o uso e cobertura da terra ao longo do período estudado (2000 a 2021) na bacia hidrográfica do rio Capiá. Houve algumas alterações quanto à classificação sugerida pelo MapBiomas, ou seja, algumas classificações foram mescladas. Essa nova reclassificação resultou em: Bioma caatinga, Agropecuária, Área urbanizada, Corpos d'água e Outras áreas não vegetadas.

A área urbana aumentou ao longo dos anos avaliados, indicando aumento populacional e adaptação dos habitantes ao ambiente semiárido.

Na bacia em estudo, prevalece o bioma Caatinga e áreas destinadas à agropecuária. Os corpos d'água não são bem visíveis devido à pequena quantidade e extensão territorial. Os rios também não estão demarcados, possivelmente devido

ao fato de o rio principal (Capiá) ser caracterizado como rio intermitente ou temporário, passando longos períodos seco em épocas de estiagem. As imagens são compostas por média anual.

A transposição do rio São Francisco (Canal do Sertão) se torna visível a partir de 2015 como Outras áreas não vejetadas, atravessando a sub-bacia 3 no sentido oeste-leste. Por ser uma construção com margens de concreto, é classificada como área urbanizada nas imagens captadas pelo satélite.

A presença de atividades agropecuária é mais frequente em áreas mais planas da bacia, que são propícias para pastagens e cultivo e de fácil acesso para os seres humanos (Araújo Filho et al., 2018).

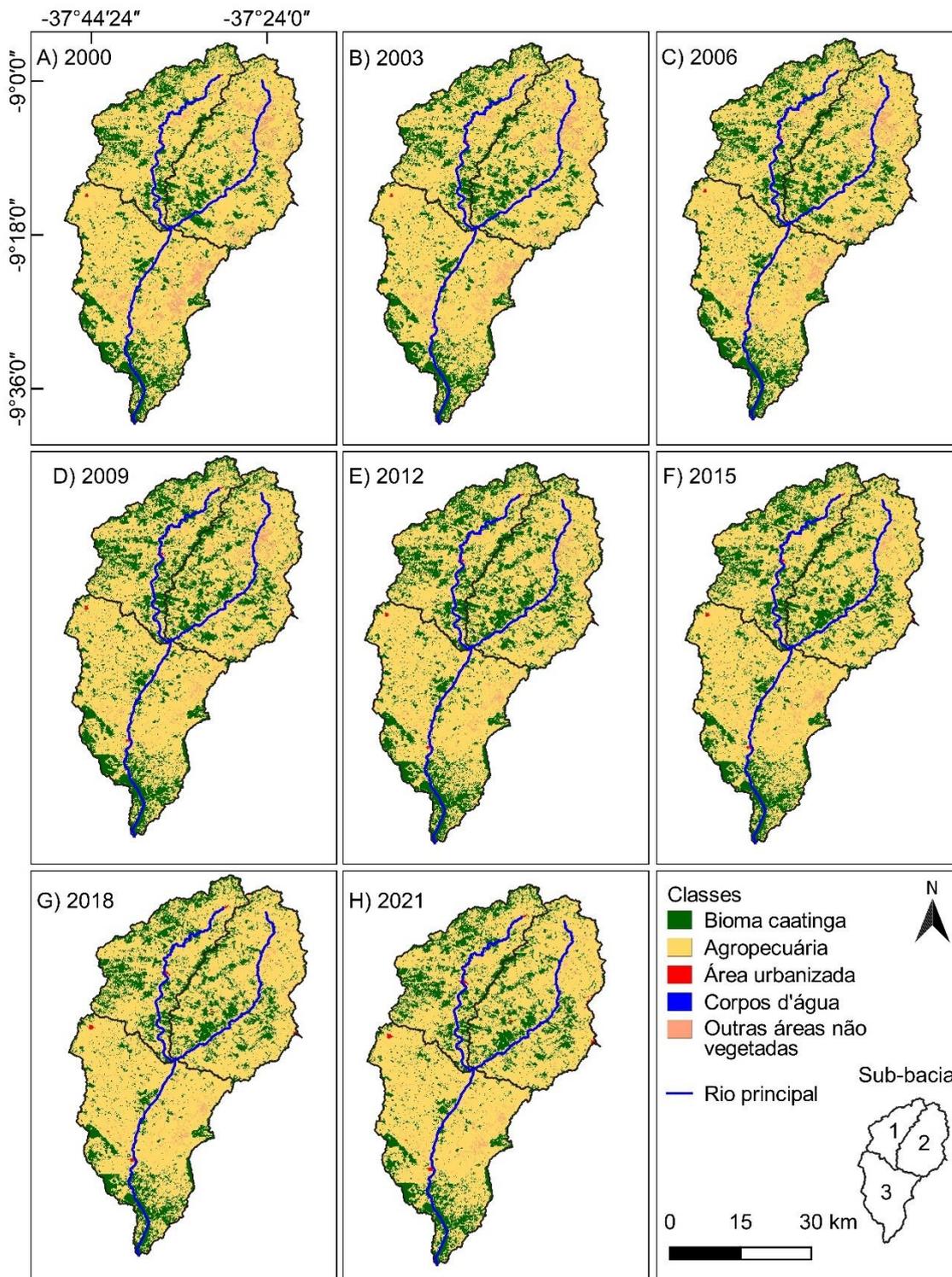


Figura 10. Alterações espaço-temporais em relação ao uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do rio Capiá entre os anos 2000 e 2021. Fonte: MapBiomias (2023) e adaptado pelo autor.

O desmatamento para a expansão de pastagens e agricultura, além de outras atividades humanas, são os principais fatores para as mudanças no uso e cobertura

da terra nos biomas brasileiros, afetando a biodiversidade, os recursos hídricos e o clima local e regional (Davidson et al., 2012; Souza et al., 2020). A Figura 11 ilustra bem a relação inversa entre o bioma Caatinga e atividade agropecuária, ou seja, enquanto uma aumenta a outra diminui, embora não necessariamente na mesma proporção.

Nos anos de 2006 e 2015, houve um equilíbrio, mas a ocupação da bacia não foi de mesma área. As atividades agropecuárias ocuparam uma extensão maior em comparação com a ocupação do bioma caatinga, o que indica uma forte presença de atividade humana na região. Resultado também observado por Seabra et al., (2014) em trabalho realizado em região semiárida da Paraíba.

Os corpos hídricos apresentaram comportamento semelhante ao aumento da área do bioma Caatinga na bacia ao longo dos anos estudado, com uma maior área de corpos d'água em 2009 e um declínio a partir do ano de 2012.

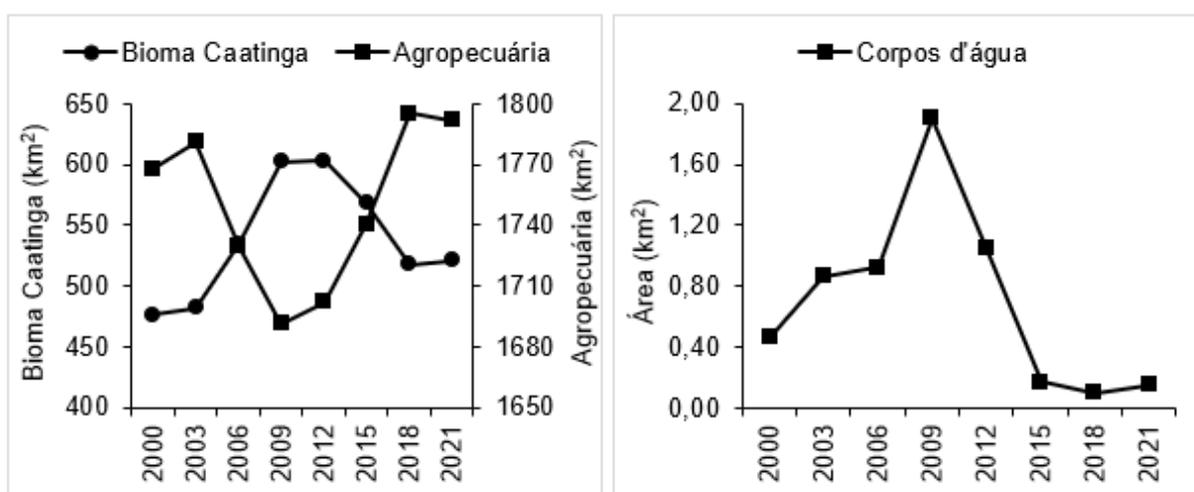


Figura 11. Evolução temporal do bioma caatinga, áreas destinadas à agropecuária e corpos d'água na bacia hidrográfica no período de 2000 a 2021.

Essa diminuição repentina da presença de corpos d'água de 2012 a 2015 pode estar relacionada à seca que o semiárido brasileiro enfrentou, sendo uma das maiores secas em décadas e que causou diversos problemas à população (Marengo; Torres; Alves, 2016; Barbosa et al., 2019).

5.5. Índices biofísicos

A distribuição espaço-temporal da precipitação pluvial ao longo do período estudado, estimado pelo CHIRPS com intervalos de três anos, é mostrado na Figura 12. A precipitação variou de aproximadamente 200 a 1700 mm anuais durante os anos avaliados.

As cores que se aproximam do amarelo indicam baixa precipitação, enquanto as que se aproximam do azul indicam elevada precipitação. Na região da sub-bacia 1, localizada ao noroeste, concentram-se os locais com maiores índices de pluviosidade anual. Por outro lado, no centro da bacia encontram-se os menores índices de precipitação pluvial. O ano de 2012 (Figura 11E) foi o ano com o menor índice de chuva na bacia, com uma precipitação estimada em 269,24 mm. De acordo com a técnica de Quantis, esse ano foi considerado o ano mais seco, como mostrado na Tabela 15.

Já relatado por outros autores, o ano de 2009 foi um dos mais chuvosos no semiárido nordestino, os períodos secos e chuvosos se alternam de modo irregular nessa região (Marengo et al., 2011). Também muito relatado, o ano de 2012 inicia um período de seca extrema no Nordeste que se estende até 2015 (Marengo; Torres; Alves, 2016; Barbosa et al., 2019; Silva et al., 2021).

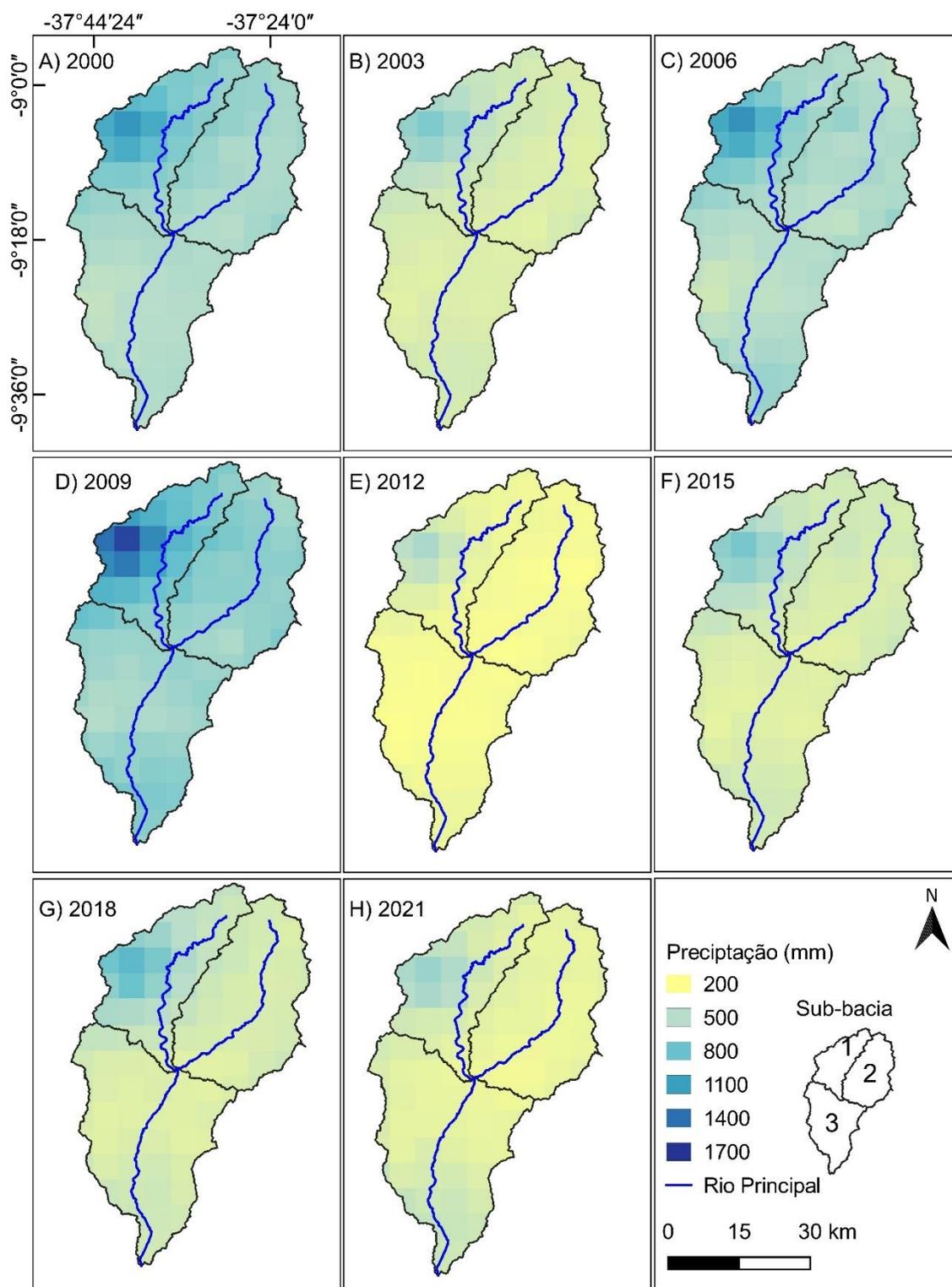


Figura 12. Distribuição espaço-temporal da precipitação pluvial estimada pelo CHIRPS na bacia hidrográfica do rio Capiá.

A Tabela 15 mostra um resumo estatístico para cada ano avaliado na Figura 12. Essas estatísticas incluem o valor máximo, média, valor mínimo e desvio padrão da precipitação estimada pelo CHIRPS. Em alguns locais da bacia, a estimativa de

precipitação anual pelo CHIRPS foi acima de 1000 mm. Isso pode ocorrer devido a microclimas específicos causados por características de relevo, como altitude, por exemplo.

Tabela 15. Estatística descritiva da precipitação estimada pelo CHIRPS na bacia hidrográfica do rio Capiá.

Ano	CHIRPS			
	Máximo	Média	Mínimo	Desvio padrão
2000	1163,37	599,72	452,08	130,56
2003	720,77	393,64	328,20	71,70
2006	1187,44	571,11	412,97	127,80
2009	1605,87	706,38	514,64	189,76
2012	556,33	269,24	218,60	58,97
2015	744,61	395,88	308,47	78,61
2018	871,93	417,45	329,35	107,39
2021	616,59	345,09	254,92	71,97

O NDVI apresentou variação temporal e espacial. Em escala espectral, as cores próximas ao vermelho indicam baixo valor e as cores próximas ao verde indicam alto valor (Figura 13). Na sub-bacia 1 e na região próxima à foz estão os maiores índices de NDVI, enquanto no centro da bacia são encontrados os menores índices em praticamente todos os anos avaliados. Isso sugere que a vegetação ao longo do tempo e do espaço é mais exuberante e saudável nas áreas próximas à foz e na sub-bacia 1, pois a maior altitude influencia a umidade e regiões de difícil acesso humano preserva a vegetação nativa. Por outro lado, o centro da bacia apresenta uma vegetação menos densa e menos saudável. Essas variações podem ser influenciadas por fatores como disponibilidade de água, fertilidade do solo e influência humana. O uso e cobertura da terra pode também influenciar no NDVI, como foi observado por Caetano et al., (2022).

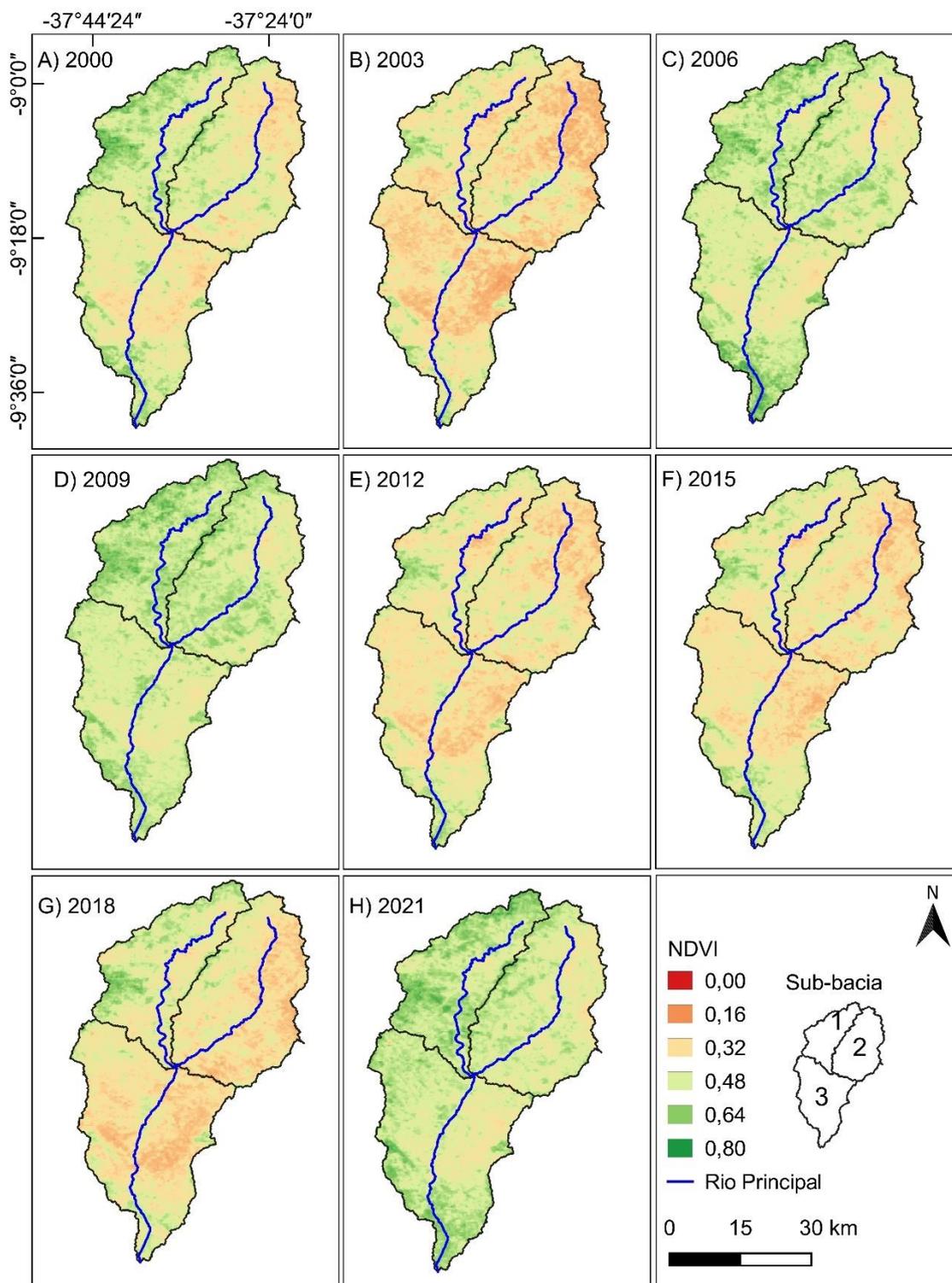


Figura 13. Distribuição espaço-temporal do NDVI na bacia hidrográfica do rio Capiá.

No entanto, ao observar a Figura 13, podemos ver que o padrão de distribuição do NDVI ao longo desses anos não é totalmente consistente. Em alguns anos, como 2003, 2012, 2015 e 2018, há áreas com valores extremamente baixos de NDVI,

indicando uma vegetação de baixa densidade ou mesmo ausente. Já em outros anos, como 2009 e 2021, há áreas com valores mais altos de NDVI, indicando uma vegetação mais saudável e densa. A Tabela 16 apresenta alguns dados estatísticos referente aos anos avaliados na Figura 13. Os anos de 2003 e 2012 tiveram as menores médias, representando 0,36 e 0,38, respectivamente, enquanto os anos de 2009 e 2021 apresentaram as maiores médias. Esses valores médios de NDVI são apenas uma média geral da região central da bacia, e pode haver variações significativas dentro dessa região.

Tabela 16. Estatística descritiva do NDVI na bacia hidrográfica do rio Capiá.

Ano	NDVI			
	Máximo	Média	Mínimo	Desvio padrão
2000	0,76	0,44	0,23	0,09
2003	0,69	0,36	0,16	0,08
2006	0,76	0,49	0,26	0,08
2009	0,75	0,50	0,29	0,07
2012	0,71	0,38	0,21	0,08
2015	0,68	0,39	0,21	0,08
2018	0,73	0,39	0,21	0,09
2021	0,76	0,50	0,28	0,08

O SAVI apresentou, de uma forma geral, valores menores em comparação com o NDVI. Uma das características do SAVI é minimizar o efeito do solo de fundo no sinal da vegetação, ao incorporar uma constante de ajuste de solo (Figura 14). Segundo Braz et al., 2015, o SAVI apresenta resultado mais confiável em relação ao NDVI ao minimizar o efeito do solo e representar melhor o vigor da vegetação.

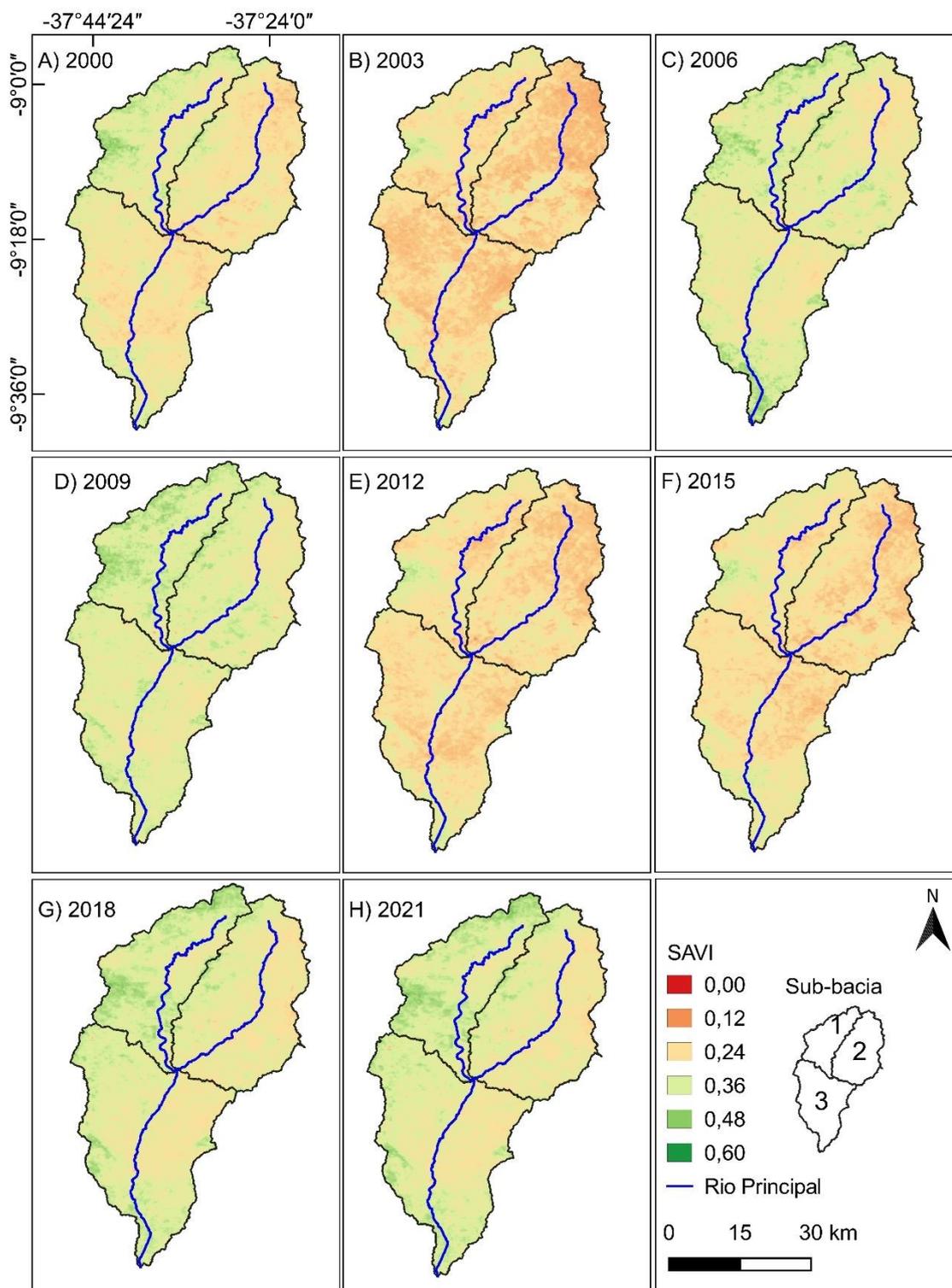


Figura 14. Distribuição espaço-temporal do SAVI na bacia hidrográfica do rio Capiá.

A distribuição espacial e temporal também seguiu o padrão do NDVI, com os anos de 2003, 2012 e 2015 apresentando as menores médias, de 0,24, 0,26 e 0,26,

respectivamente (Tabela 17). O desvio padrão foi quase unânime, de 0,04 entre os anos avaliados, com exceção do ano 2000, que se diferenciou com o valor de 0,05.

Tabela 17. Estatística descritiva do SAVI na bacia hidrográfica do rio Capiá.

Ano	SAVI			
	Máximo	Média	Mínimo	Desvio padrão
2000	0,49	0,29	0,17	0,05
2003	0,42	0,24	0,12	0,04
2006	0,50	0,32	0,18	0,04
2009	0,48	0,34	0,15	0,04
2012	0,45	0,26	0,12	0,04
2015	0,42	0,26	0,14	0,04
2018	0,51	0,33	0,20	0,04
2021	0,51	0,33	0,20	0,04

O IAF é um indicador de biomassa, pois quantifica a relação entre a área foliar de toda a vegetação e a área utilizada por essa vegetação. A Figura 15 mostra a distribuição do IAF na bacia. É importante lembrar que o IAF está intimamente relacionado ao SAVI e, juntamente com o NDVI, pode fornecer informações sobre biomassa, área foliar e cobertura vegetal do solo.

De acordo com Galvíncio et al. (2020), o IAF tem uma forte correlação com a precipitação, o que significa que é uma variável fortemente influenciada pelo clima. Os mesmos autores enfatizam que a precipitação está relacionada à fisionomia da vegetação de caatinga. De fato, Barbosa e Lakshmi Kumar (2016) concluíram que a vegetação da caatinga responde de perto às variações da chuva.

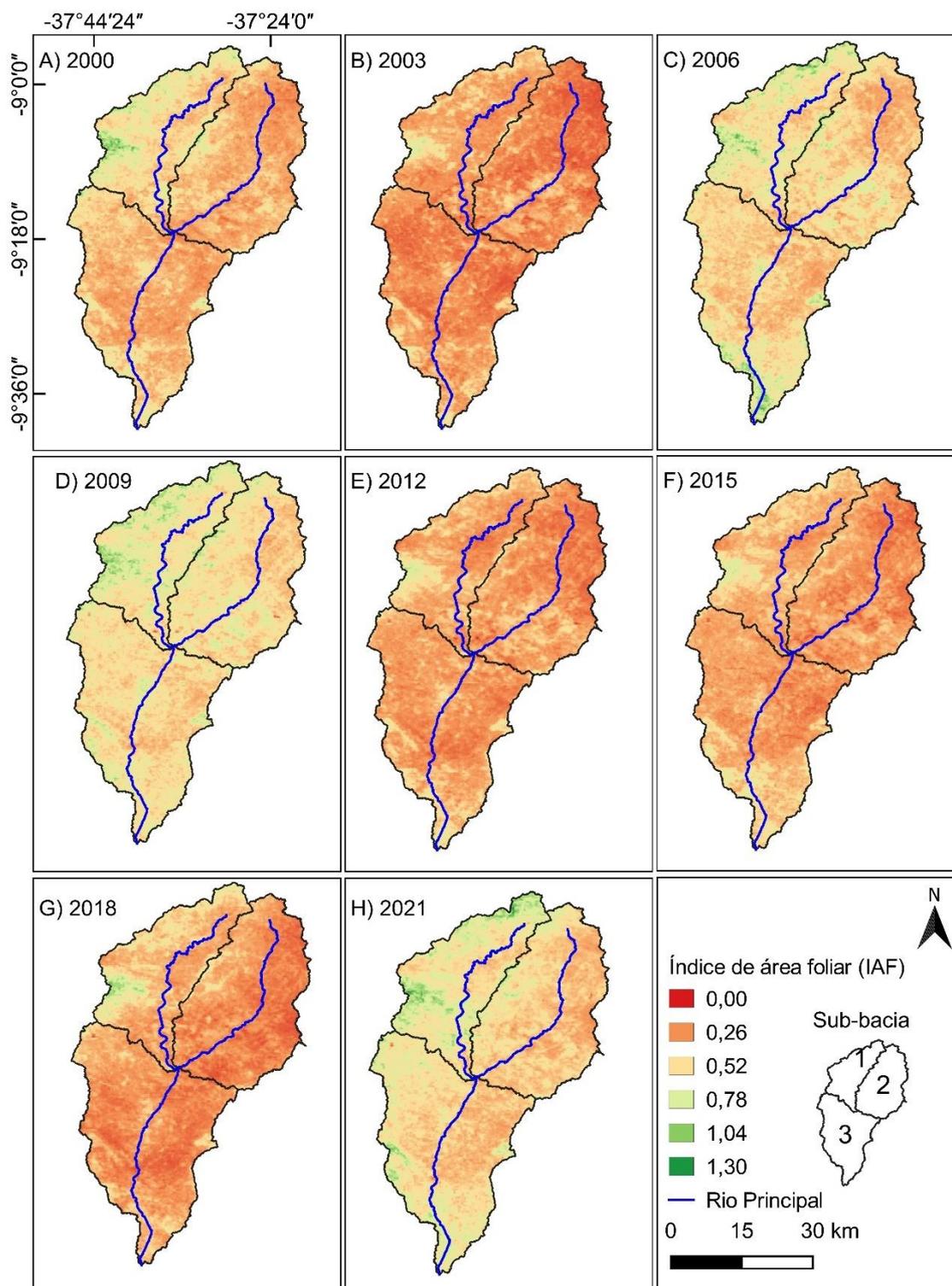


Figura 15. Distribuição espaço-temporal do IAF na bacia hidrográfica do rio Capiá.

A média do IAF na bacia variou em pequenos valores. O ano de 2009 apresentou maior valor (0,57), enquanto o ano de 2003 apresentou menor valor (0,30) entre os anos avaliados na Figura 15. O IAF médio da caatinga em período seco é considerado 0,19, e durante o período chuvoso é 0,80, de acordo com os valores estimados pelo

LANDSAT-8. Entretanto, quando o VANT (Veículo aéreo não tripulado) é utilizado, esses valores são alterados dependendo da câmera utilizada. Para os períodos secos, os valores são de 0,26 e 0,14 com a câmera RGB e RGN do VANT, respectivamente. Por outro lado, no período chuvoso, os valores são de 2,18 e 0,48 (Santos et al., 2022).

Tabela 18. Estatística descritiva do IAF na bacia hidrográfica do rio Capiá.

Ano	IAF			
	Máximo	Média	Mínimo	Desvio padrão
2000	1,20	0,44	0,14	0,14
2003	0,88	0,30	0,03	0,10
2006	1,22	0,53	0,17	0,14
2009	1,14	0,57	0,09	0,12
2012	0,97	0,34	0,03	0,10
2015	0,86	0,36	0,08	0,11
2018	1,15	0,33	0,10	0,13
2021	1,31	0,55	0,20	0,14

O NDWI (*Normalized Difference Water Index*) permite a análise hidrológica na região, pois realça a presença de água nas imagens. No entanto, a presença de água está associada à presença de vegetação devido ao aumento significativo da umidade nessa área. A Figura 16 mostra distribuição de água na bacia. Nessa região, onde está inserida a bacia, não existem grandes extensões de água, apenas pequenas açudes, barragens e lagos que estão sujeitos a variações de precipitação pluvial.

As áreas com valores positivos indicam a presença de água, enquanto os valores negativos representam áreas de solo. Foram encontrados os maiores valores para NDWI na sub-bacia 1 e na região da foz, enquanto os menores foram encontrados na região central da bacia. Segundo pesquisas, o NDWI tem correspondência com a vegetação, solo exposto e área urbana (Ferreira et al., 2012; Leonardo et al., 2019). Logo, isso pode explicar os baixos valores na área central e altos valores na região da bacia.

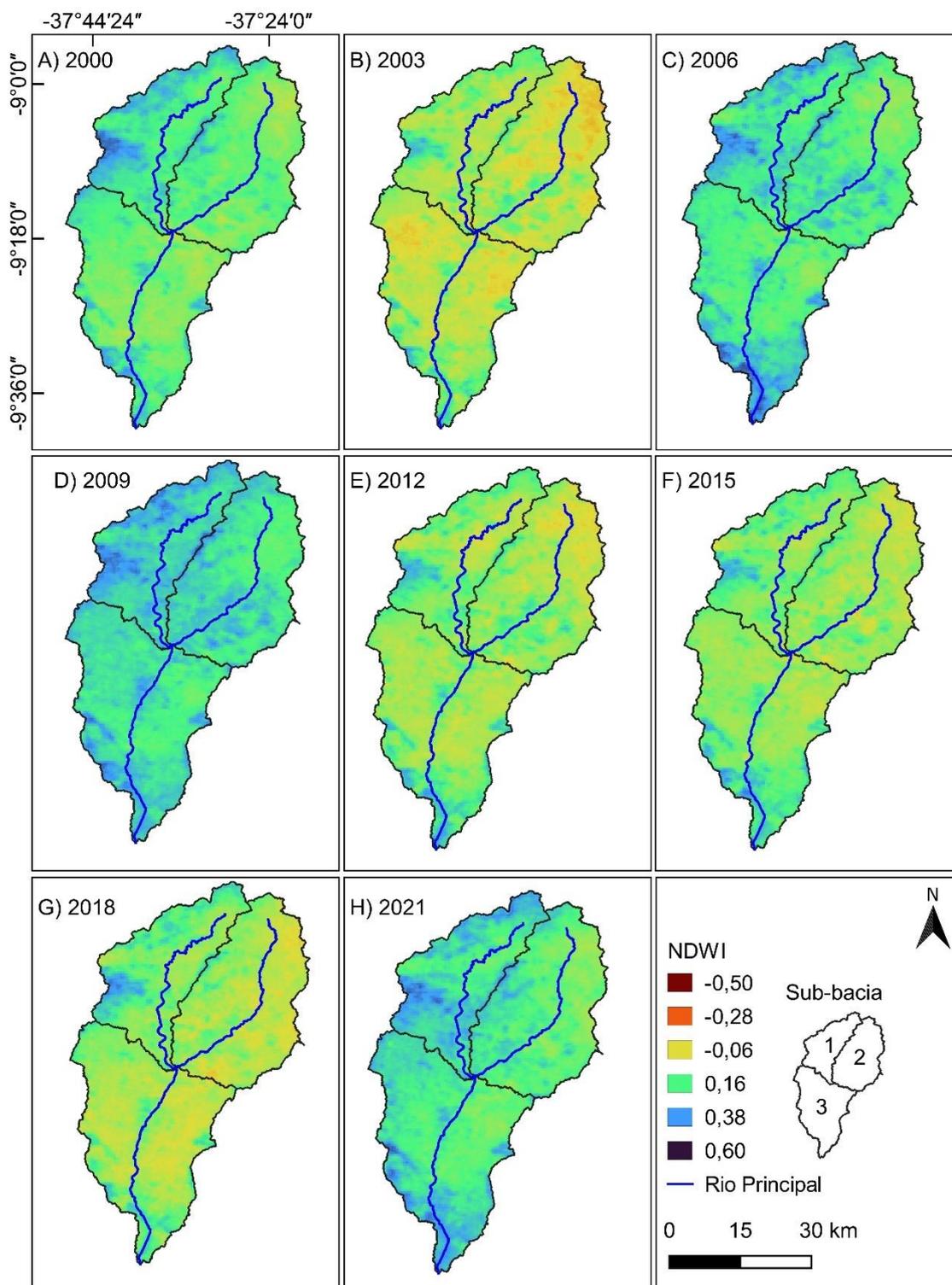


Figura 16. Distribuição espaço-temporal do NDWI na bacia hidrográfica do rio Capiá.

A Tabela 19 mostra algumas informações estatísticas referentes aos anos avaliados na Figura 16. O ano 2003 teve a menor média, assim como foi acompanhado pelos índices até agora. Os anos de 2012, 2015 e 2018 também se

destacaram pelas baixas médias, comparadas aos anos com as maiores média (2009 e 2021).

Tabela 19. Estatística descritiva para NDWI na bacia hidrográfica do rio Capiá.

Ano	NDWI			
	Máximo	Média	Mínimo	Desvio padrão
2000	0,49	0,15	-0,03	0,08
2003	0,37	0,02	-0,14	0,08
2006	0,51	0,19	0,00	0,08
2009	0,49	0,24	0,08	0,07
2012	0,39	0,07	-0,09	0,08
2015	0,43	0,08	-0,10	0,08
2018	0,45	0,06	-0,10	0,08
2021	0,49	0,20	0,00	0,08

A Figura 17 mostra a distribuição da evapotranspiração real (ET_r) na bacia em estudo, com variação espacial e temporal influenciada pelas condições ambientais. Sabendo-se que a evapotranspiração real diz respeito à soma conjunta da evaporação do solo e vegetação úmida e da transpiração dos vegetais em condições reais do ambiente, ela está diretamente relacionada à capacidade da vegetação de absorver a umidade do solo por meio das raízes e perdê-la para a atmosfera, principalmente pela via foliar (Lins et al., 2017).

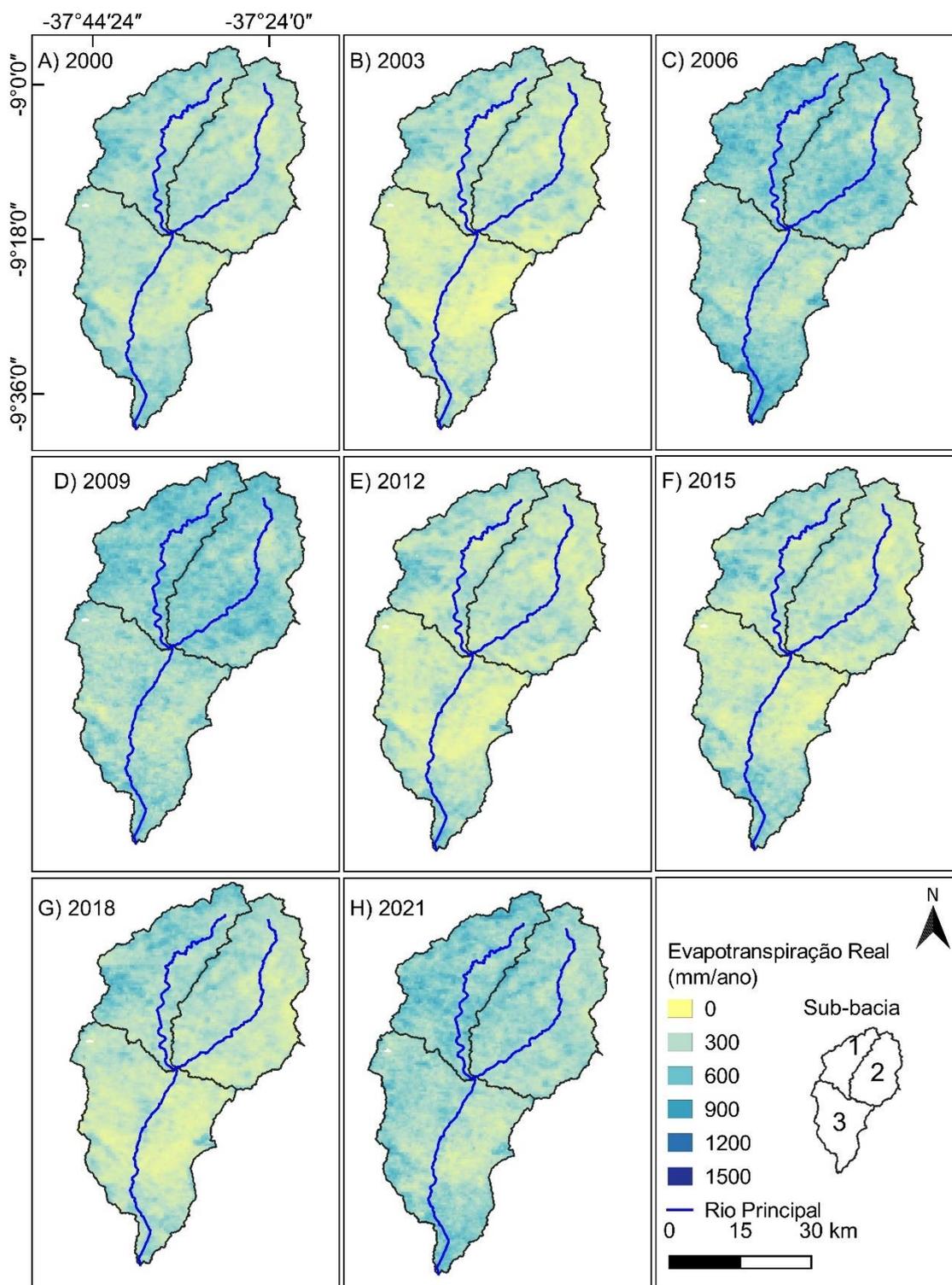


Figura 17. Distribuição espaço-temporal da Evapotranspiração real na bacia hidrográfica do rio Capiá.

As informações numéricas estão descritas na Tabela 20. O valor máximo e mínimo corrobora com a grande variação espacial da ETr devido à distribuição de

vários elementos na bacia, como o uso e cobertura da terra. Os anos 2003, 2012, e 2015 apresentaram as menores médias.

Tabela 20. Estatística descritiva para ETr na bacia hidrográfica do rio Capiá.

Ano	ETr (mm/ano)			
	Máximo	Média	Mínimo	Desvio padrão
2000	1343	605	367	137
2003	809	250	36	105
2006	1020	434	110	131
2009	924	436	99	125
2012	741	268	58	105
2015	829	284	71	112
2018	866	296	80	116
2021	1023	405	121	120

Diferentemente da ETr, a evapotranspiração potencial (ETP) representa a transferência de água para atmosfera em condições ideais, portanto, apresenta valores mais elevados em relação à ETr. A distribuição espacial e temporal da ETP é mostrado na Figura 18 e ocorre praticamente em toda a extensão da bacia, pois mesmo sem vegetação, o solo exposto sofre o processo de evaporação devido à incidência direta dos raios solares.

Algumas pesquisas indicam que a média anual de ETP no semiárido brasileiro está entre 1500 a 2000 mm/ano, o que é muito superior à precipitação pluvial anual, resultando em déficit hídrico. Os solos expostos na bacia apresentam maior capacidade de absorção de calor, o que eleva a temperatura da superfície (T_s) e aumenta evaporação (Araújo Filho et al., 2018; Pinheiro et al., 2020). No entanto, os valores encontrados aqui para ETP estão condizentes com os encontrados pelos autores. As áreas de menor ETP (coloração amarela) correspondem aos locais com presença humana (áreas urbanizadas, Figura 10), pois as construções reduzem a evaporação do solo e a transpiração da vegetação.

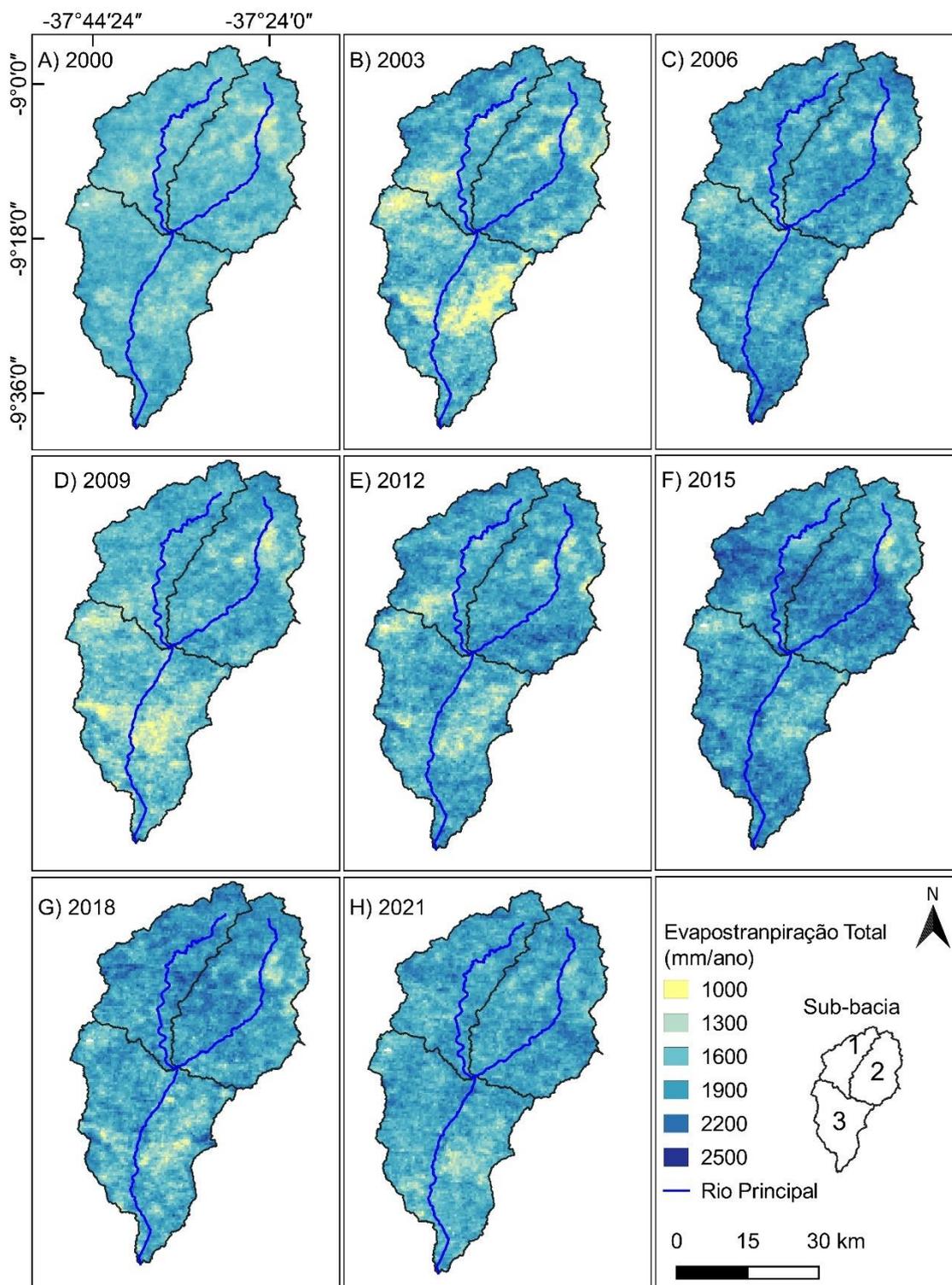


Figura 18. Distribuição espaço-temporal da Evapotranspiração Potencial na bacia hidrográfica do rio Capiá.

A Tabela 21 apresenta um resumo estatístico dos anos avaliados na Figura 18. A média indicada é superior aos valores de precipitação na bacia, o que indica uma

condição de solo bem suprido com água e uma vegetação saudável. Os valores mostram uma maior consistência de ano para ano, embora haja uma variação mais intensa nos valores máximos e mínimos devido às diferentes características de solo e clima na bacia.

Tabela 21. Estatística descritiva para ETP na bacia hidrográfica do rio Capiá.

Ano	ETP (mm/ano)			
	Máximo	Média	Mínimo	Desvio padrão
2000	2181	1641	975	154
2003	2536	1655	589	273
2006	2554	1827	979	213
2009	2290	1662	719	225
2012	2517	1785	887	232
2015	2594	1896	898	230
2018	2498	1834	915	226
2021	2362	1805	1021	186

A Figura 19 mostra a distribuição da temperatura da superfície na bacia, com os menores valores de temperatura encontrados em regiões com presença de vegetação. A presença de vegetação pode ter efeito de resfriamento devido à evapotranspiração. Durante esse processo, as plantas liberam água pela transpiração e, à medida que a água evapora, ocorre resfriamento da superfície. Isso ajuda a reduzir o aquecimento do solo e do ar na área circundante.

A temperatura média anual do ar no semiárido brasileiro, onde está localizada a bacia em estudo, varia entre 24 e 28°C (Ximenes et al., 2019). Essa temperatura elevada é diretamente influenciada pela superfície, que geralmente apresenta temperaturas mais altas. A temperatura da superfície está ligada a radiação solar absorvida, que é transformada em energia térmica. O resfriamento é mais lento que no ar (Sousa, et al., 2021).

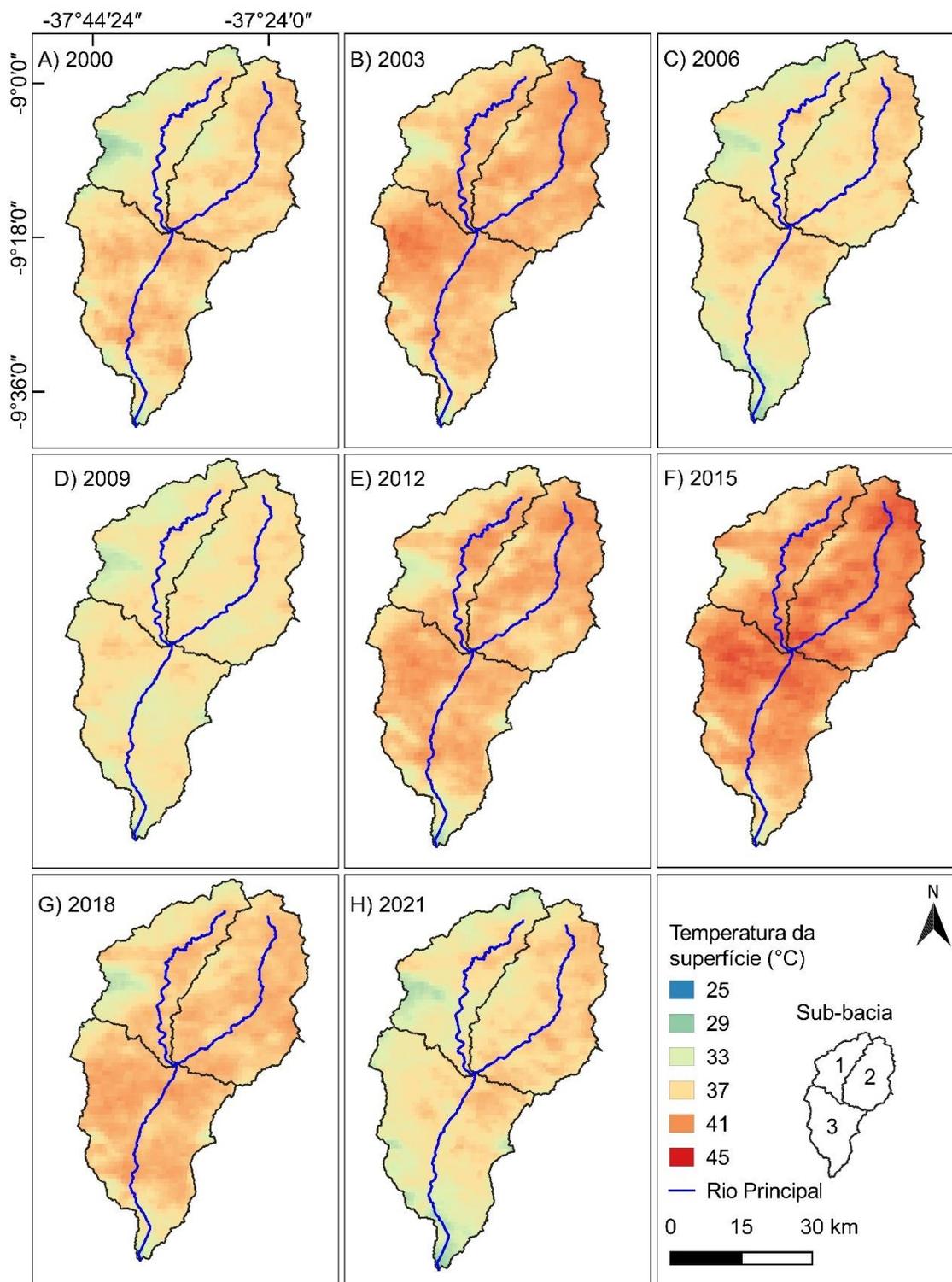


Figura 19. Distribuição espaço-temporal da Temperatura na bacia hidrográfica do rio Capiá.

A Tabela 22 apresenta informações estatísticas sobre a temperatura da superfície (T_s) na bacia em estudo. Existem pontos na bacia que podem atingir mais de 40°C de temperatura na superfície, e isso depende muito do tipo de material que

cobre essa superfície. Por exemplo, áreas urbanas com pouco vegetação apresentam temperaturas mais elevadas, enquanto a presença de vegetação é um fator importante para diminuir a temperatura tanto da superfície quanto do ar. Por outro lado, locais com vegetação densa ou corpos d'água podem ter temperaturas mínimas, mas baixas.

Tabela 22. Estatística descritiva para temperatura da superfície na bacia hidrográfica do rio Capiá.

Ano	Temperatura (°C)			
	Máximo	Média	Mínimo	Desvio padrão
2000	41	37	30	1,79
2003	42	38	31	1,53
2006	39	36	29	1,58
2009	39	36	31	1,21
2012	41	38	30	1,72
2015	43	40	32	1,82
2018	41	38	31	1,61
2021	40	36	29	1,82

Muitos índices apresentaram distribuição espacial e temporal semelhante devido às características de influência em comum, tais como o relevo e a hidrografia da bacia, além do uso e cobertura da terra na área.

O relevo da bacia é uma característica intrínseca e não sofre influências da ação humana. Por outro lado, a hidrografia e o uso e cobertura da terra podem ser alterados por ações antrópicas, embora os efeitos dessas mudanças possam levar muito tempo para se manifestar.

Em relação ao relevo, os índices Precipitação, NDVI, SAVI, IAF, NDWI, ETr e Temperatura da superfície (Figuras 12, 13, 14, 15, 16, 17 e 19) apresentaram forte associação com a altitude (Figura 2) e com o mapa de inclinação da bacia (ver Figura 5b). Nas regiões Noroeste da bacia hidrográfica (sub-bacia 1), e no Sul, na região da foz, esses índices apresentaram valores mais elevados, com exceção da Temperatura da superfície, que apresentou valores mais baixos.

Conforme discutido no tópico de Morfometria da bacia, a região Noroeste da bacia é caracterizada pela presença de uma região montanhosa de grandes altitudes (~ 800 m), conhecida como Maciço de Mata Grande (Gois et al., 2021). A alta precipitação e a baixa temperatura de superfície em relação ao entorno, presentes em

locais de grandes altitudes, são resultados da influência orográfica (Barros et al., 2012).

Barbosa e Kumar (2016) mencionam que a água é um fator limitante que domina o estresse da vegetação no semiárido brasileiro e, conseqüentemente, o NDVI é uma variável de resposta à precipitação pluvial. Se o NDVI é influenciado, então o SAVI, IAF e NDWI também serão influenciados pela precipitação.

Na região sul da bacia, conhecida como região da foz, o NDWI e o NDVI também apresentaram valores também elevados, pois a presença de água nessa região melhora as condições para o desenvolvimento e permanência da vegetação.

As regiões classificadas como plano na bacia hidrográfica (Figura 5b) foram caracterizadas por altas Temperatura da superfície e baixos valores dos índices biofísicos (com exceção da ETP). Isso se deve ao uso e cobertura da terra (Figura 10), já que as regiões planas sofrem maior interferência humana. A retirada da vegetação para criação de pastagens expõe o solo diretamente aos raios solares, resultando em menores valores de NDVI, SAVI, IAF, NDWI, ETr e elevadas temperaturas da superfície.

As áreas de pastagens na bacia apresentam reduzido valor de ETr devido à baixa presença de vegetação, o que reduz o processo de transpiração pelas plantas e eleva a Temperatura da superfície.

A Figura 20 mostra a relação entre alguns parâmetros avaliados neste estudo em escala temporal (anual). Assim como a distribuição espacial, os índices pluviométricos, NDVI, SAVI, IAF e NDWI seguem um padrão de comportamento semelhante ao longo dos anos estudados.

Foi relatado na literatura uma seca em 2002 no Nordeste brasileiro ocasionado por mudanças na Temperatura da superfície do mar (Marengo; Torres; Alves, 2016). No entanto, neste estudo, a bacia se destacou para o ano de 2003 como tendo baixa precipitação pluvial, juntamente com baixas médias anuais para os índices NDVI, SAVI, IAF e NDWI.

O ano de 2003 foi classificado como seco e o ano de 2002 como muito chuvoso (Tabela 14) para a bacia hidrográfica estudada. Mesmo incluído no polígono das secas, é importante levar em consideração a presença de regiões de microclima, como o Maciço de Mata de Grande, que pode ter contribuído significativamente para a divergência da literatura e que está relativamente próximo ao litoral nordestino.

O período de 2004 a 2011 foi classificado como normal a muito chuvoso (Tabela 14) e está destacado na Tabela 19 pelos devido aos elevados índices em comparação aos anos de 2003 e 2012.

O período de 2012 a 2015 no semiárido brasileiro é amplamente relatado na literatura por ter apresentado baixos índices de precipitação pluvial por um longo intervalo de tempo, o que não ocorria há várias décadas. Isso trouxe várias consequências para a comunidade agrícola (Marengo; Torres; Alves, 2016; Barbosa et al., 2019; Silva et al., 2021). Na bacia em estudo, esse período se estendeu até 2019 (Figura 19), com baixas precipitações e, conseqüentemente, redução dos índices de vegetação, acompanhando simultaneamente ao ano.

O IAF, como já discutido na Figura 15, possui estreita relação com o NDVI, e a vegetação da caatinga explica o comportamento do índice, com fisiologia e morfologia adaptadas às variações de água disponível para a sobrevivência dessa vegetação. As folhas, durante a estiagem, apresentam perda de coloração verde e redução da área útil da copa, em uma adaptação evolutiva conhecida como caducifolia (Barbosa e Kumar, 2016).

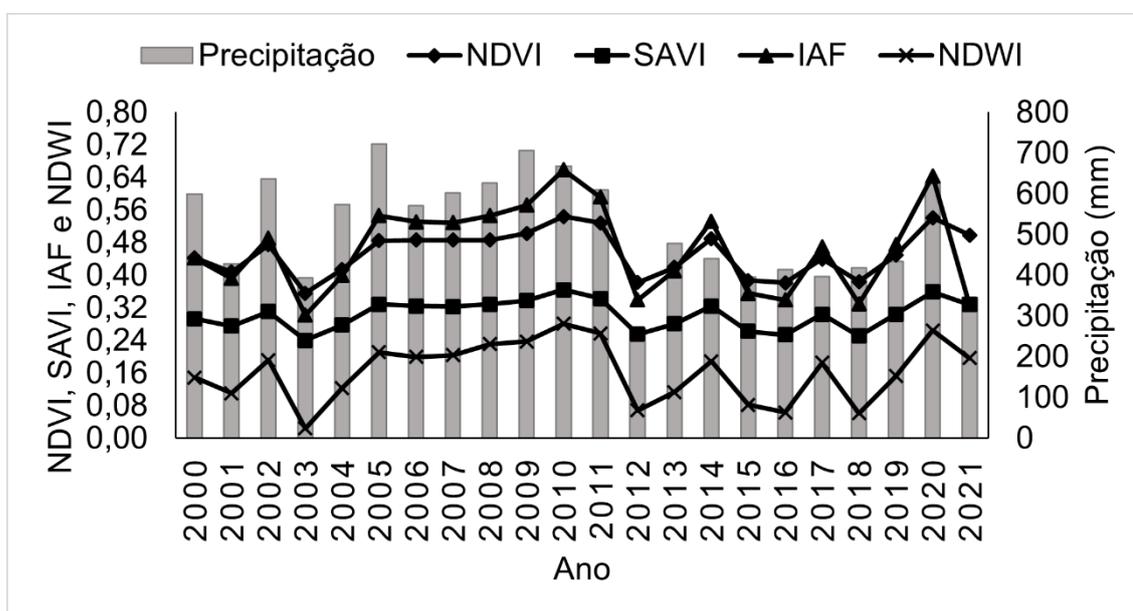


Figura 20. Distribuição anual acumulada da precipitação pluvial (mm) e médias anuais de NDVI, SAVI, IAF e NDWI na bacia hidrográfica do rio Capiá de 2000 a 2021.

O NDWI, como média anual, apresentou valores positivos para todo os anos avaliados, No entanto, os corpos d'água na bacia são escassos e sujeitos a variação

das chuvas. Grande parte das áreas agrícolas encontradas na bacia possui pequenos açudes, e o fornecimento de água para alguns pontos da bacia é suprido com a transposição do rio São Francisco, que corta a sub-bacia 3 no sentido Oeste-Leste (Tópico 7.4).

Uma característica do semiárido (clima da bacia hidrográfica em estudo), além da baixa precipitação pluvial, é a temperatura elevada, representada pela Temperatura da superfície. A Figura 21 mostra o comportamento anual da Temperatura da superfície e do IAF na bacia hidrográfica. Existe uma relação inversa entre esses dois parâmetros, devido à maior incidência dos raios solares sobre o solo com a diminuição da cobertura vegetal. As folhas desempenham um papel importante na cobertura e proteção do solo, e sem elas a Temperatura da superfície aumenta, acelerando o processo de desertificação (Galvêncio et al., 2020; Santos et al., 2022).

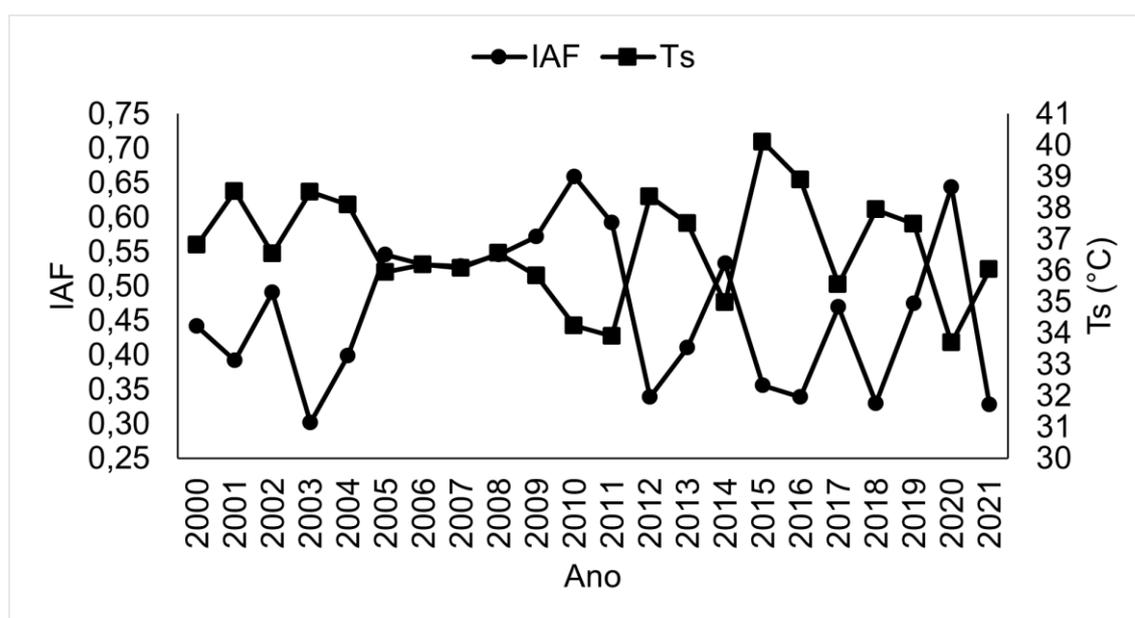


Figura 21. Comportamento do Índice de Área Foliar (IAF) e da Temperatura da superfície (Ts) de 2000 a 2021 na bacia hidrográfica do rio Capiá.

A ETP apresentou valor superior a precipitação pluvial na bacia. Esses dados são importantes para estudos referentes aos índices de seca, como, por exemplo, o Índice de Precipitação Padronizada (SPI), o Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI) e o Índice de Evapotranspiração de Precipitação Padronizada (SPEI).

Outras pesquisas no semiárido brasileiro indicaram ETP média anual entre 2100 e 2200 mm (Oliveira Júnior et al., 2023), um valor superior ao encontrado no presente

trabalho, onde o máximo não ultrapassou 1900 mm/ano (ano de 2015). Algumas cidades presentes na bacia hidrográfica em estudo apresentaram ETP anual de 1169,6 mm/ano para Mata grande, 1574,4 mm/ano para Canapi e 2046,5 mm/ano para Piranhas, considerando um período de 30 anos (Gois et al., 2005). Barros et al., (2012) encontraram valores de 1100 mm/ano para Mata Grande, 1200 mm/ano para Canapi e 1400 mm/ano para Piranhas, considerando um período de mais de 20 anos. Essa divergência de valores pode ser atribuída a diferentes técnicas e períodos considerados.

Houve uma região da bacia em que o índice pluviométrico foi bem semelhante à ETP. O Maciço de Mata Grande apresentou um índice de precipitação superior a 1000 mm/ano para todos os anos avaliados nesse estudo (Figura 12). Gois et al., (2005) e Barros et al., (2012) estimaram precipitação de 1110 mm/ano e 1200 mm/ano, respectivamente, para a cidade de Mata Grande. Essa é a região da bacia com os maiores índices de chuva, conforme mencionado ao longo deste trabalho. A proximidade com a ETP está no próprio conceito da ETP, que significa a demanda máxima de água pela cultura (vegetais) e se torna um referencial de máxima reposição de água, seja pela irrigação ou pela precipitação pluvial.

Uma relação inversa entre a precipitação e a ETP foi constatada no presente trabalho, conforme citado por alguns pesquisadores: em período de baixa precipitação, pode ocorrer uma ETP elevada devido à maior irradiação e menor umidade do ar em dias secos causados pelo aumento da temperatura (Collischonn e Tucci 2014; Sousa, et al., 2021).

A ETr apresentou valores menores em relação à precipitação ao longo do período estudado. Lins et al. (2021) encontraram valores médios de 722,9 mm para precipitação pluvial, 1.663,7 para ETP e 534,7 mm para ETr em bacia hidrográfica no semiárido brasileiro no período de 2000 a 2019. Esses valores são semelhantes aos encontrados no presente trabalho. Outros autores também encontraram valores ligeiramente mais elevados para outras regiões do semiárido brasileiro (Andrade et al., 2017; Magalhães et al. 2018).

Assim como mostrado na Figura 20, a Figura abaixo evidenciou o período longo de estiagem que perdurou de 2012 a 2019 no semiárido brasileiro, com ETP elevada e baixa precipitação pluvial.

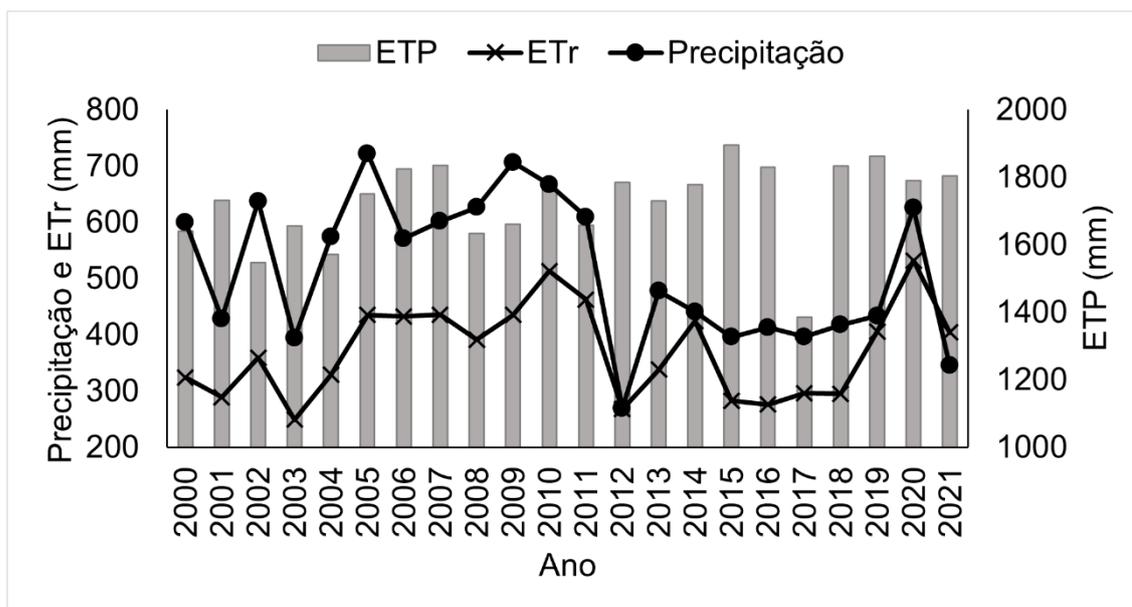


Figura 22. Distribuição da chuva acumulada anual (mm), Evapotranspiração potencial e real (mm) na bacia hidrográfica do rio Capiá no período de 2000 a 2021.

A Figura 23 delimitou o período seco e chuvoso na bacia hidrográfica, como já relatado por diversos estudos no semiárido brasileiro (Silva; Sousa, 2013; Barbosa *et al.*, 2019). O período chuvoso se estendeu de fevereiro a julho, e o período seco de agosto a janeiro, como observado por Pinheiro *et al.* (2020) no semiárido pernambucano. A redução da cobertura vegetal é notável no período de estiagem, como indicado pelos índices NDVI, SAVI, IAF e NDWI na Figura 23.

No período seco, muitas espécies apresentam características de sobrevivência diante da adversidade climática, como a redução da copa com a perda das folhas (Ferreira *et al.*, 2017).

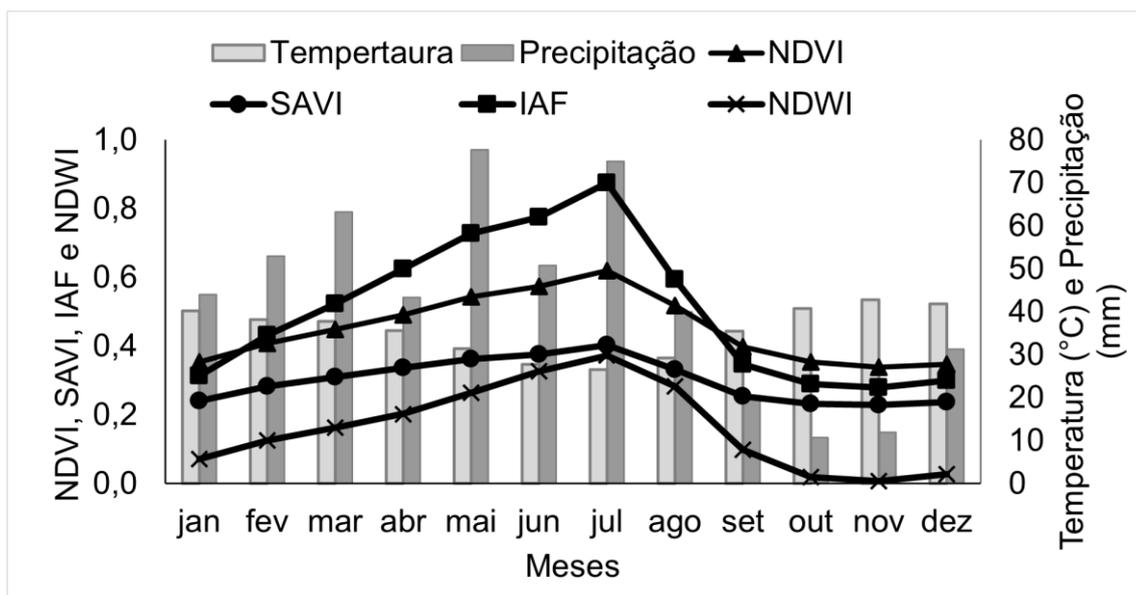


Figura 23. Distribuição mensal dos índices biofísicos na bacia hidrográfica do rio Capiá no período de 2000 a 2021.

Nota-se um efeito inverso da Temperatura da superfície com os outros índices (incluindo a precipitação) (Figura 23 e 24), com exceção da ETP. É fato que a precipitação atua como um regulador térmico do ambiente, reduzindo a temperatura, e que a vegetação contribui para esse efeito.

A ETP também possui uma relação inversa com a precipitação na escala mensal e é diretamente proporcional à Temperatura da superfície. Collischonn e Tucci (2014) estudaram essas relações e fizeram algumas observações que corroboram com o presente trabalho: a radiação solar incidente é a principal variável explicativa para o aumento da ETP em períodos de estiagem, o que eleva a Temperatura da superfície.

É possível notar que no período chuvoso a evapotranspiração real (ET_r) é menor que a precipitação, e no período seco a ET_r ultrapassa a precipitação. Esse aumento é acompanhado com o aumento da temperatura e da ETP. De acordo com Sousa *et al.* (2021), os valores mínimos de ETP geralmente ocorrem entre os meses de janeiro a maio em regiões de semiárido.

A precipitação é a causa de diversas consequências, como variações dos índices NDVI, SAVI, IAF, NDWI, EP e ETP. Em outras palavras, esses índices são resultados da variação da precipitação pluvial.

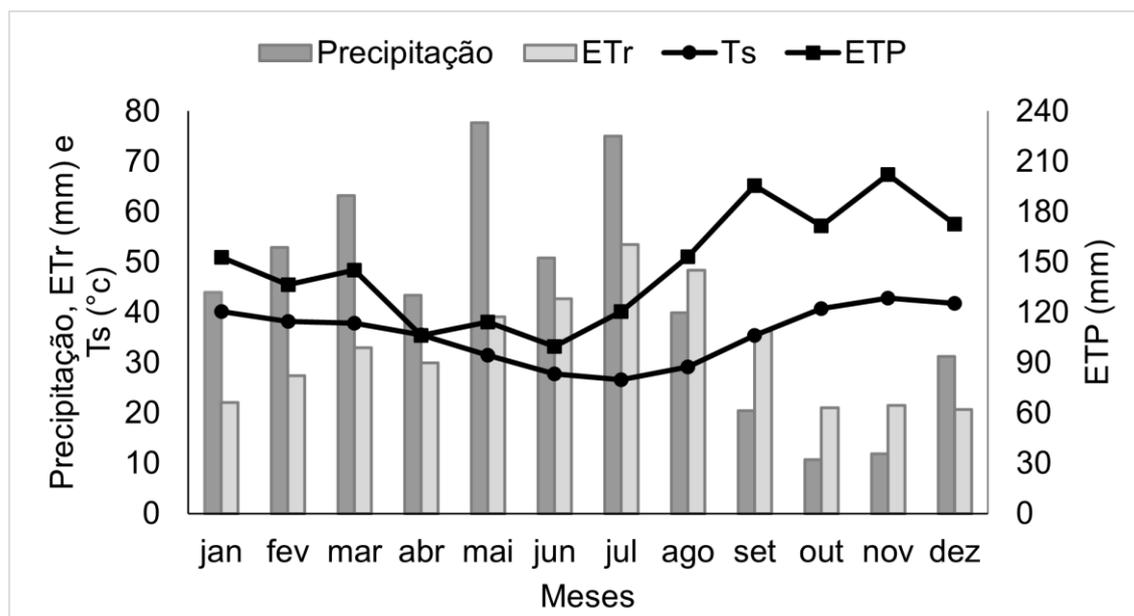


Figura 24. Distribuição mensal da Precipitação, ETr, Temperatura da superfície e ETP na bacia hidrográfica do rio Capiá no período de 2000 a 2021.

5.6. Análise estatística dos índices biofísicos

O coeficiente de correlação de Pearson é um bom indicativo para avaliar a relação entre duas variáveis de medida, e a Tabela 23 resume essas informações em escala anual para os índices biofísicos avaliados no presente estudo.

Quanto mais próximo de 1, maior é a relação positiva entre variáveis, enquanto valores próximos de -1 indicam uma relação inversa, ou seja, quando uma variável aumenta, a outra diminui.

Essas informações complementam as apresentadas nas Figuras 19, 20 e 21. O NDVI possui correlação positiva com SAVI, IAF, NDWI, ETr e precipitação pluvial (P), indicando que essas variáveis tendem a aumentar ou diminuir juntas. Destaca-se que o SAVI apresentou uma correlação de 0,99 com o NDVI. Por outro lado, o NDVI apresenta correlação negativa com ETP e Temperatura da superfície. No entanto, a ETP possui uma correlação próxima de zero (-0,04) com o NDVI, indicando uma correlação muito fraca. Além disso, a ETP apresenta correlação fraca e negativa com o SAVI, IAF, NDWI e P, e uma correlação fraca e positiva ETr e Temperatura da superfície. De acordo com Allen *et al.*, (1998), a ETP independe do tipo de vegetação e seu desenvolvimento, e os fatores do solo não afetam a ETP. O único impacto na ETP é causado pelos parâmetros climáticos.

Tabela 23. Coeficiente de correlação de Pearson para os índices biofísicos em escala anual.

	NDVI	SAVI	IAF	NDWI	ETr	ETP	Ts	P
NDVI	1,00							
SAVI	0,99	1,00						
IAF	0,89	0,90	1,00					
NDWI	0,98	0,99	0,91	1,00				
ETr	0,95	0,94	0,89	0,91	1,00			
ETP	-0,04	-0,07	-0,11	-0,16	0,17	1,00		
Ts	-0,91	-0,90	-0,84	-0,89	-0,86	0,21	1,00	
P	0,67	0,68	0,79	0,72	0,67	-0,22	-0,56	1,00

Ts: temperatura da superfície e P: precipitação pluvial

A Temperatura da superfície possui correlação negativa muito forte com os índices NDVI, SAVI, IAF e NDWI, ou seja, o aumento desses índices tem efeito significativo sobre a diminuição da Temperatura da superfície.

Em escala de tempo mais curta, essas correlações se aproximam mais, com mostrado na Figura 24 pelo coeficiente de correlação de Pearson em escala mensal. Nessa escala, a variação climática é menor e mais uniforme, o que ajuda a explicar as melhores correlações observadas. A precipitação apresentou boas correções positivas com os índices NDVI, SAVI, IAF e NDWI, com valores semelhantes para escala anual. Neste caso, as correlações entre esses índices foram ótimas (0,99).

Barbosa e Kumar (2016) avaliaram a influência da chuva na dinâmica da vegetação no Nordeste brasileiro e encontraram uma correlação de 0,60 entre precipitação e NDVI, valor inferior ao presente trabalho (0,75). É importante ressaltar que o Nordeste possui mais de uma classificação climática, o que pode influenciar no resultado final, considerando que a bacia em estudo está inserida no semiárido, com períodos seco e chuvoso bem delimitados.

Tabela 24. Coeficiente de correlação de Pearson para os índices biofísicos em escala mensal.

	NDVI	SAVI	IAF	NDWI	ETr	ETP	T	P
NDVI	1,00							
SAVI	0,99	1,00						
IAF	0,99	1,00	1,00					
NDWI	0,99	0,98	0,97	1,00				
ETr	0,91	0,86	0,86	0,93	1,00			
ETP	-0,79	-0,84	-0,83	-0,78	-0,50	1,00		
Ts	-0,96	-0,92	-0,91	-0,97	-0,96	0,66	1,00	
P	0,75	0,80	0,79	0,75	0,60	-0,78	-0,62	1,00

T: temperatura da superfície e P: precipitação pluvial

A ETr e a ETP apresentaram correlações opostas em relação aos índices NDVI, SAVI, IAF e NDWI. A ETr apresentou correlação positiva, enquanto a ETP apresentou correlação negativa, ambas com correlação forte. Existem relatos de que a ETr pode ser utilizada para quantificar a severidade da seca (Dai, 2010). No entanto, Begueria *et al.*, (2012) confirmaram que a ETP é um o melhor estimador da demanda evaporativa real. Os resultados mostrados na Tabela 25 corroboram com o autor, pois a ETP está anticorrelacionada com os índices de vegetação. Se a vegetação diminui, a ETP aumenta junto com a temperatura da superfície, indicando aumento da seca.

As Figuras 25 a 32 mostram os resultados do teste de Mann – Kendall e Theil-Sen para os índices avaliados nesse estudo. A ideia é determinar onde está ocorrendo aumento ou diminuição e qual a magnitude desse fenômeno.

De modo geral, a precipitação apresenta tendência de queda em toda a extensão da bacia. A maior magnitude de diminuição (coloração vermelha no mapa) encontra-se na sub-bacia 1, especificamente na região de maior altitude (Figura 24A). Além disso, essa diminuição foi significativa com 5% de probabilidade (Figura 25B).

Alguns pesquisadores também encontraram tendência negativa em outras regiões do semiárido, porém, sem significância estatística (Bezerra *et al.* 2018; Oliveira Júnior *et al.*, 2023).

Bezerra *et al.* 2018, ao analisarem a região do Baixo São Francisco (onde a bacia em estudo está inserida), detectaram níveis de crescimento da precipitação pluvial, mas sem significância. Segundo Stephenson e Cols (2014), a baixa coerência espacial nos índices de precipitação ocorrem devido à alta variabilidade espacial e temporal, ao contrário do que ocorre com a temperatura da superfície.

Tendências menores de diminuição foram encontradas na sub-bacia 3, próximo à foz, que é uma região de baixa altitude. Grande parte dessa região apresentou significância com 5% de probabilidade.

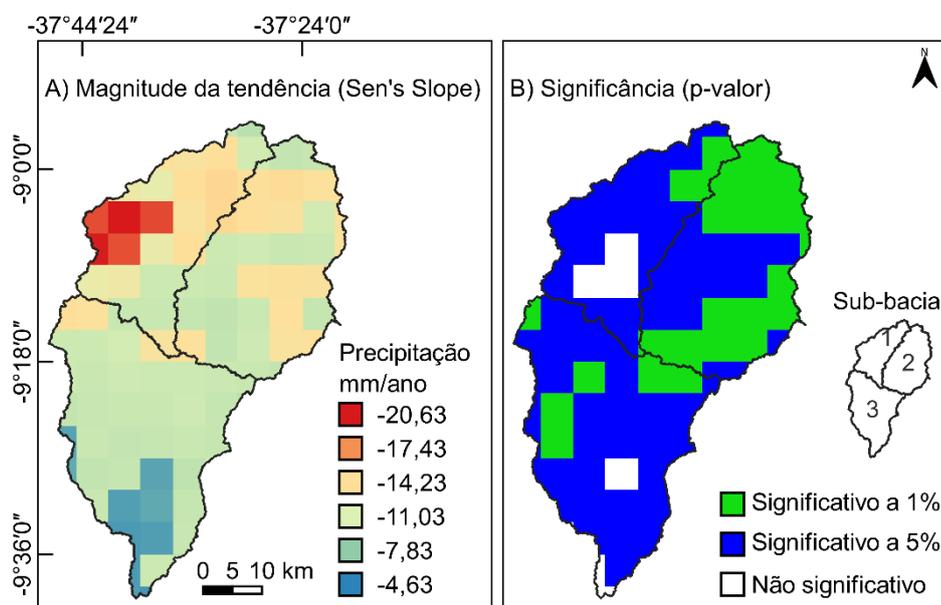


Figura 25. Representação espacial da magnitude da tendência (A) e significância (B) da precipitação pluvial.

Os índices NDVI, SAVI, IAF e NDWI apresentaram ampla variação quanto à tendência de aumento e diminuição (Figuras 26A, 27A, 28A e 29A). Grande parte da bacia mostrou uma tendência de aumento para NDVI, SAVI e NDWI (coloração verde e azul), com destaque para a região norte da bacia, onde foram observados alguns pontos com significância de 5% de probabilidade. Por outro lado, notou-se uma tendência oposta para o IAF, já que grande parte da bacia apresentou tendência de queda com significância de 1% e 5% para os valores extremos (Figura 28B).

Os valores extremos de diminuição (coloração vermelha) foram significativos com uma probabilidade de 1% e 5% (Figuras 26B, 27B e 29B).

Esses valores extremos estão mais concentrados nas sub-bacias 2 e 3, que correspondem à região mais plana da bacia e mais sujeita a alterações antrópicas, principalmente nas áreas onde as atividades agropecuárias são mais intensas. Na sub-bacia 2, também há uma grande presença do bioma caatinga, onde foi observada uma tendência de queda nos índices.

Conforme descrito por Oliveira Júnior *et al.* (2023), esses índices permitem discernir mudanças específicas na cobertura vegetal ao longo do tempo. Em relação ao NDVI, a Europa possui a maior proporção de tendências de crescimento significativas (49,71%), seguida pela América do Sul (40,73%). Por outro lado, a América do Norte é o continente com a maior proporção de tendências decrescentes significativas de NDVI (7,63%), seguida pela América do Sul (7,31%) (X. Li e Y. Qu, 2019; Dagnachew *et al.*, 2020).

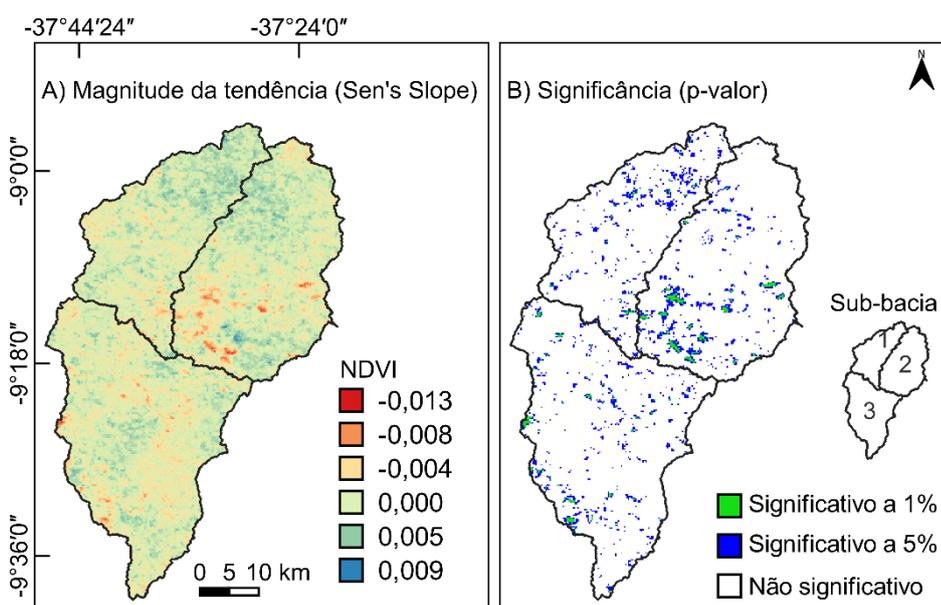


Figura 26. Representação espacial da magnitude da tendência (A) e da significância (B) do NDVI.

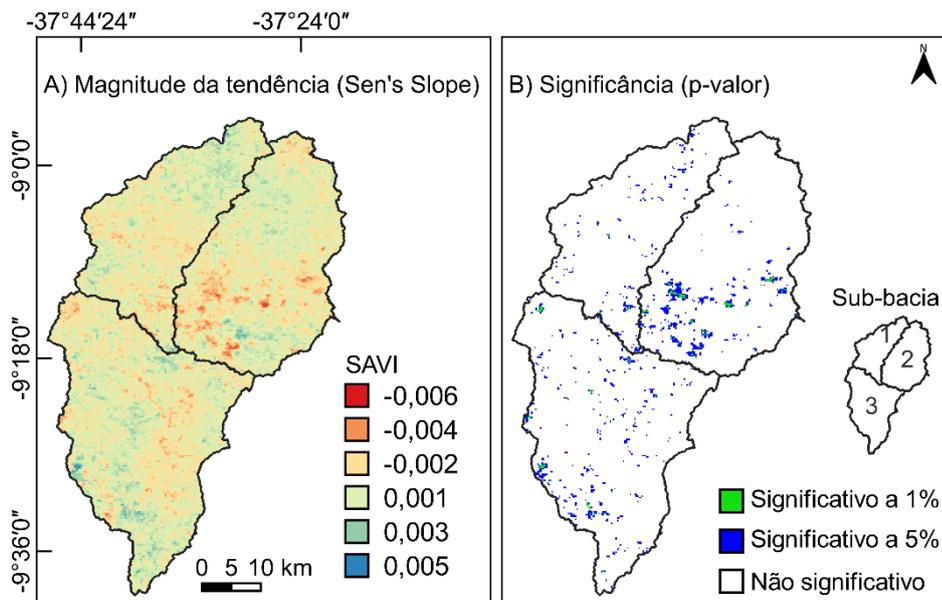


Figura 27. Representação espacial da magnitude da tendência (A) e da significância (B) do SAVI.

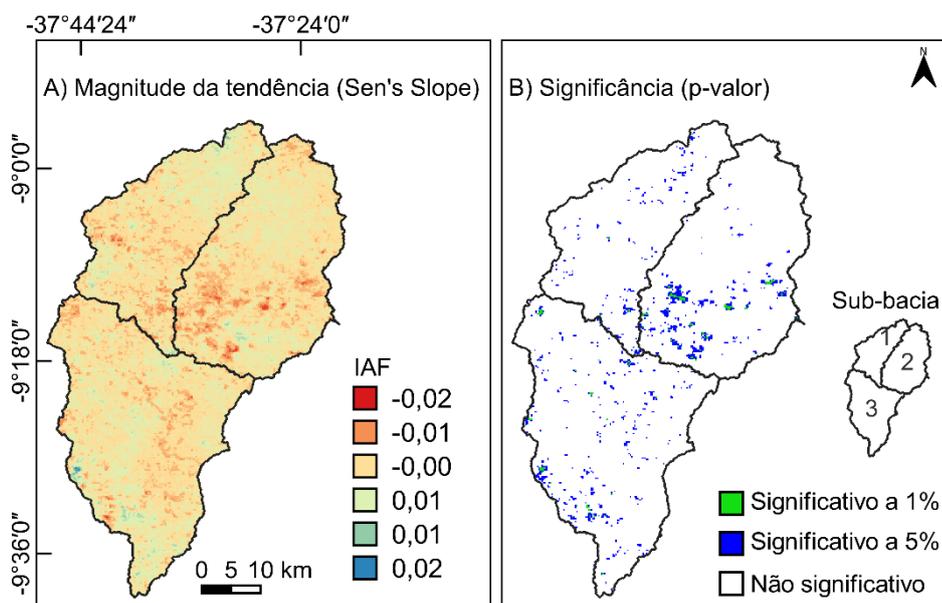


Figura 28. Representação espacial da magnitude da tendência (A) e da significância (C) do IAF.

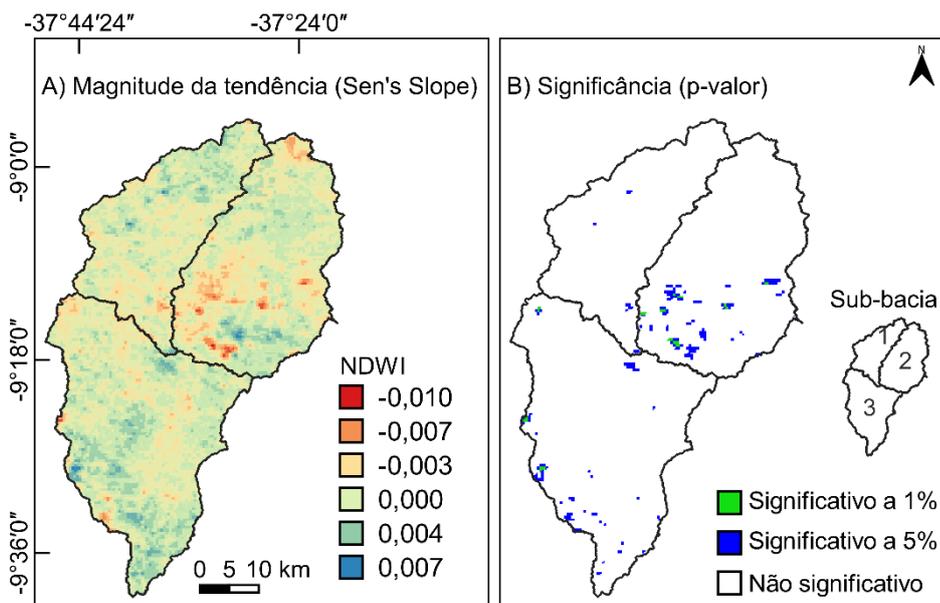


Figura 29. Representação espacial da magnitude da tendência (A) e da significância (B) do NDWI.

A sub-bacia 3 apresentou maior porção de tendências de queda para ETr, juntamente com uma pequena parte ao sul e ao norte da sub-bacia 2 (Figura 30A). A significância está distribuída em toda a bacia, com maior presença na sub-bacia 2, onde são encontrados os maiores níveis de crescimento da ETr e os menores níveis de decaimento.

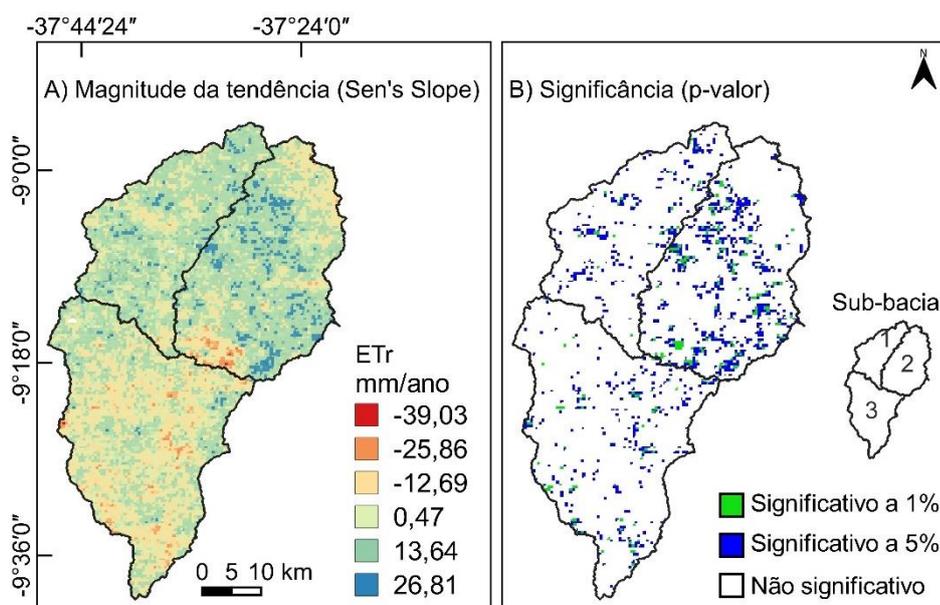


Figura 30. Representação espacial da magnitude da tendência (A) e da significância (B) do ETr.

Foi observada uma maior quantidade de áreas com tendência de queda para ETr, o que coincidiu com o SAVI. Essas áreas foram significativamente maiores em comparação com as áreas com tendência de decréscimo, sendo estimadas em até -18,46 mm/ano. Uma explicação para essa diminuição é a degradação da terra que ocorre no semiárido brasileiro (Mariano *et al.*, 2018).

De acordo com Cook *et al.* (2014), o aumento da ETP pode levar a períodos de seca, especialmente em áreas onde a precipitação já é reduzida. A perda de água para a atmosfera leva a secagem do solo, e os autores enfatizam que a seca é geralmente definida como um déficit na umidade do solo agrícola.

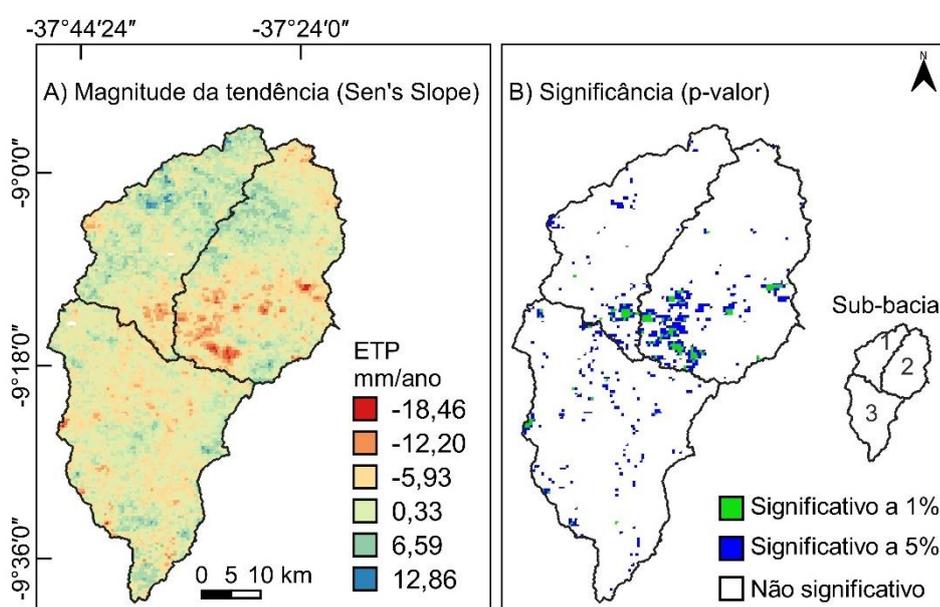


Figura 31. Representação espacial da magnitude da tendência (A) e significância (B) do ETP.

Espera-se que a ETr aumente menos do que a ETP em áreas onde os fluxos de calor latente são, ou se tornarão, limitados pelo suprimento de umidade (Cook *et al.*, 2014). No presente estudo, a ETr na bacia apresentou taxas de aumento de até 26,81 mm/ano, enquanto a ETP apresentou aumento de 12,86 mm/ano em algumas áreas da bacia. Da mesma forma, houve uma redução na ETr, com taxas de diminuição de até -39,03 mm/ano.

No que diz respeito à Ts, foram observadas tendências tanto de aumento como de diminuição, com uma maior área da bacia apresentando tendência de diminuição (Figura 32), principalmente nas regiões com presença de pastagens. No entanto, essas tendências não foram significativas.

Scheff e Frierson (2014) sugeriram que a ETP pode aumentar no futuro, devido a um aumento na disponibilidade total de energia na superfície. Como discutido na Tabela 24 e nas tabelas de correlação, existe uma relação próxima entre a evapotranspiração (ET) e a Temperatura da superfície. Áreas que mostraram indicativos de queda de Temperatura da superfície também apresentaram queda da ETP. A Temperatura da superfície é um indicativo da umidade do solo, ou seja, quanto menos umidade houver, menos água disponível para evaporação.

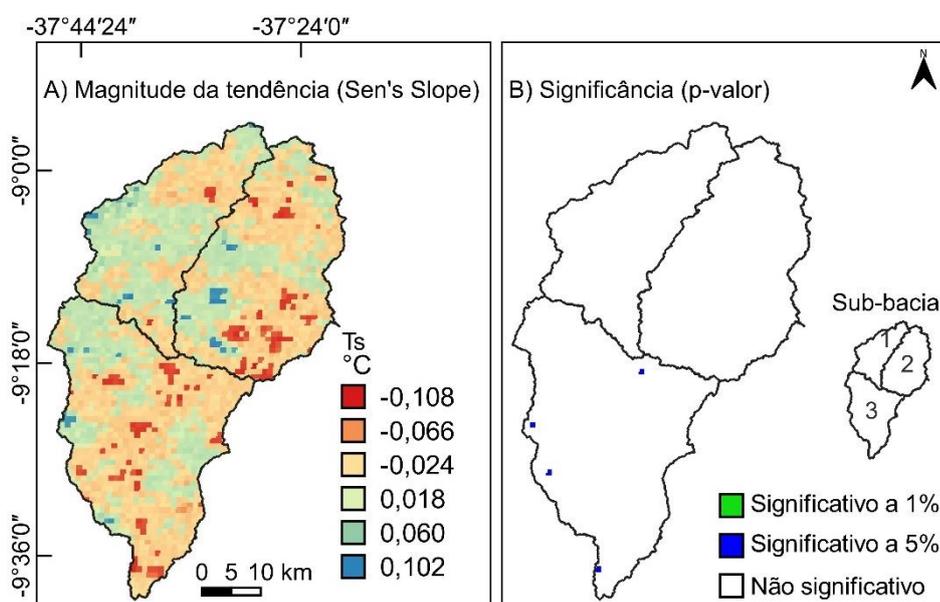


Figura 32. Representação espacial da magnitude da tendência (A) e significância (B) da Temperatura da superfície (Ts).

6. CONCLUSÕES

A bacia hidrográfica do rio Capiá apresenta formato alongado com pouca propensão a enchentes em condições normais de precipitação pluvial em curto período, dados comprovados pelo $K_c = 2,275$, $K_f = 0,329$, $I_c = 0,189$ e $Re = 0,647$. A bacia apresenta uma densidade de drenagem regular e o rio principal tem características tortuosas. A razão de relevo é considerada baixa para a bacia. O sistema de drenagem é de sexta ordem e 63,95% da área da bacia é considerado plana.

O CHIRPS apresentou boa performance para estimar dados de precipitação pluvial na bacia, mas com tendência de superestimar. A técnica de Quantis

estabeleceu que o ano de 2012 (269,24 mm) foi o ano mais seco e 2005 (721,68 mm) o ano mais chuvoso no período estudado (2000 a 2021).

Segundo o uso e cobertura da terra do MapBiomas, a bacia apresentou predominância de áreas destinadas à agropecuária em todos os anos avaliados, principalmente em regiões planas. Houve uma relação temporal inversa entre as áreas de Bioma caatinga e áreas de Agropecuária. O bioma caatinga predomina em locais de baixo acesso para seres humanos.

A avaliação dos índices biofísicos elaborados a partir dos produtos MODIS na plataforma GEE permitiu inferir diversas conclusões a respeito da vegetação na bacia. Altitude e declividade elevadas promovem índices mais elevados, como Precipitação pluvial, NDVI, SAVI, IAF, NDWI e ETr. Por outro lado, as áreas de pastagens também influenciaram na diminuição dos índices de vegetação e aumento da Temperatura da superfície.

A seca de 2012 a 2015 ficou bem evidenciada, com baixas médias anuais de Precipitação, ETr, NDVI, SAVI, IAF e NDWI. O período chuvoso e seco na bacia foi bem delimitado, seguindo a literatura. No período chuvoso, houve uma ascensão dos índices de vegetação, enquanto o período seco houve uma queda desses índices como resposta ao baixo índice pluviométrico. A ETr superou a precipitação no período seco, enquanto o efeito contrário ocorreu no período chuvoso.

Os parâmetros biofísicos NDVI, SAVI, IAF, NDWI, ETr e Temperatura da superfície tiveram boa correlação com precipitação pluvial. Os índices de vegetação e precipitação não influenciaram na ETP em escala anual, mas influenciaram em escala mensal, a escala de tempo menor é mais sujeita a variações. Os índices de vegetação reduzem drasticamente a Temperatura da superfície e elevam a ETr.

A análise de Mann-Kedall e Sen's Slope Estimator revelou que a precipitação está diminuindo anualmente com maior intensidade para regiões de grande altitude e menor intensidade para regiões de baixa altitude.

7. REFERÊNCIAS

ACOSTA SALVATIERRA, Luis H. *et al.* Protected areas buffer the Brazilian semi-arid biome from climate change. **Biotropica**, v. 49, n. 5, p. 753-760, 21 jun. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/btp.12459>. Acesso em: 21 ago. 2023.

ALDHSHAN, Shaban R. S.; SHAFRI, Helmi Zulhaidi Mohd. Change detection on land use/land cover and land surface temperature using spatiotemporal data of Landsat: a

case study of Gaza Strip. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 12, n. 14, jul. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4597-4>. Acesso em: 21 ago. 2023.

ALLEN, Richard *et al.* **SEBAL**: surface energy balance algorithms for land. Idaho: Advanced Training And Users Manual August, 2002. 97 p. Disponível em: <https://www.posmet.ufv.br/wp-content/uploads/2016/09/MET-479-Waters-et-al-SEBAL.pdf>. Acesso em: 22 ago. 2022.

ANDRADE, Carolyne Wanessa Lins de *et al.* Modelagem hidrológica sob escassez de dados na Bacia do Alto Mundaú, Nordeste do Brasil. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 2, n. 3, p. 227-238, 31 jul. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.24221/jeap.2.3.2017.1443.227-238>. Acesso em: 22 ago. 2023.

ARAÚJO FILHO, Renisson Neponuceno de *et al.* Recovery of carbon stocks in deforested caatinga dry forest soils requires at least 60 years. **Forest Ecology and Management**, v. 407, p. 210-220, jan. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.10.002>. Acesso em: 21 ago. 2023.

BAIG, Muhammad Hasan Ali *et al.* COmparison of MNDWI and DFI for water mapping in flooding season. *In*: IGARSS 2013 - 2013 IEEE INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, 2013, Melbourne, Australia. **IGARSS 2013 - 2013 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium**. [S. l.]: IEEE, 2013. ISBN 9781479911141. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/igarss.2013.6723425>. Acesso em: 21 ago. 2023.

BARBOSA, Humberto Alves *et al.* Assessment of Caatinga response to drought using Meteorat-SEVIRI Normalized Difference Vegetation Index (2008–2016). **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 148, p. 235-252, fev. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.12.014>. Acesso em: 21 ago. 2023.

BARBOSA, H. A.; LAKSHMI KUMAR, T. V. Influence of rainfall variability on the vegetation dynamics over Northeastern Brazil. **Journal of Arid Environments**, v. 124, p. 377-387, jan. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2015.08.015>. Acesso em: 21 ago. 2023.

BARROS, Alexandre Hugo Cezar *et al.* **Climatologia do Estado de Alagoas**. 2. ed. Recife: Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Solos, 2012. 33 p. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/103956/1/BPD-211-Climatologia-Alagoas.pdf>. Acesso em: 22 ago. 2022.

BENEDETTI, Ana Caroline Paim *et al.* Uso do produto MOD13Q1 do sensor Modis para análise temporal e mapeamento das florestas nas Serras do Sudeste e Campanha Meridional do Rio Grande do Sul. **Revista Árvore**, v. 37, n. 3, p. 459-467, jun. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0100-67622013000300009>. Acesso em: 21 ago. 2023.

BEZERRA, Alan César *et al.* Monitoramento Espaço-Temporal da Detecção de Mudanças em Vegetação de Caatinga por Sensoriamento Remoto no Semiárido Brasileiro. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 1, p. 286, 6 abr. 2020.

Disponível em: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.1.p286-301>. Acesso em: 21 ago. 2023.

BEZERRA, Bergson G. *et al.* Changes of precipitation extremes indices in São Francisco River Basin, Brazil from 1947 to 2012. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 135, n. 1-2, p. 565-576, 6 fev. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2396-6>. Acesso em: 22 ago. 2023.

BRAZ, Adalto Moreira; ÁGUAS, Thiago De Andrade; MIRANDOLA GARCIA, Patricia Helena. Análise de índices de vegetação NDVI e SAVI e índice de área foliar (IAF) para a comparação da cobertura vegetal na bacia hidrográfica do córrego ribeirãozinho, município de selvíria – MS. **Revista Percurso**, v. 7, n. 2, p. 5, 16 dez. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.4025/revpercurso.v7i2.28758>. Acesso em: 26 dez. 2023.

CAETANO, Robert *et al.* Uso de índices espectrais na caracterização da cobertura vegetal em região de Caatinga do Semiárido Baiano. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 8, n. 2, p. 28-43, 18 ago. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.21680/2447-3359.2022v8n2id26864>. Acesso em: 21 ago. 2023.

CARDOSO, Christiany Araujo *et al.* Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do rio Debossan, Nova Friburgo, RJ. **Revista Árvore**, v. 30, n. 2, p. 241-248, abr. 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0100-67622006000200011>. Acesso em: 21 ago. 2023.

CHRISTOFOLETTI, Antônio. **Geomorfologia**. São Paulo, Universidade de São Paulo. 149 p. 1974.

CHRISTOFOLETTI, Antônio. **Geomorfologia**. São Paulo: Edgard Blucher, 2ª ed. 1980.

CHRISTOFOLETTI, Antônio. **Geomorfologia fluvial**. São Paulo-SP-Brasil: Editora E. Blücher, 1981.

COLLISCHONN, BRUNO; TUCCI, CARLOS. Relações Regionais entre Precipitação e Evapotranspiração Mensais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 3, p. 205-2014, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.21168/rbrh.v19n3.p205-2014>. Acesso em: 22 ago. 2023.

COOK, Benjamin I. *et al.* Global warming and 21st century drying. **Climate Dynamics**, v. 43, n. 9-10, p. 2607-2627, 6 mar. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2075-y>. Acesso em: 22 ago. 2023.

COSTA, Julio Cezar *et al.* VALIDAÇÃO DOS DADOS DE PRECIPITAÇÃO ESTIMADOS PELO CHIRPS PARA O BRASIL. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 24, 11 jun. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.5380/abclima.v24i0.60237>. Acesso em: 21 ago. 2023.

DAGNACHEW, Melku *et al.* Effects of Climate Variability on Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) in the Gojeb River Catchment, Omo-Gibe Basin, Ethiopia. **Advances in Meteorology**, v. 2020, p. 1-16, 10 jun. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2020/8263246>. Acesso em: 21 ago. 2023.

DAGNACHEW, Melku *et al.* Effects of Climate Variability on Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) in the Gojeb River Catchment, Omo-Gibe Basin, Ethiopia. **Advances in Meteorology**, v. 2020, p. 1-16, 10 jun. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2020/8263246>. Acesso em: 21 ago. 2023.

DAI, Aiguo. Drought under global warming: a review. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change**, v. 2, n. 1, p. 45-65, 19 out. 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/wcc.81>. Acesso em: 22 ago. 2023.

DAVIDSON, Eric A. *et al.* The Amazon basin in transition. **Nature**, v. 481, n. 7381, p. 321-328, 18 jan. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nature10717>. Acesso em: 21 ago. 2023.

DE ALBUQUERQUE LINS LEONARDO, Haylla Rebeka *et al.* Geotechnology in the analysis of behavior spectral of natural resources in the Semiarid pernambucano. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, v. 9, n. 4, p. 191, 26 dez. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.29150/jhrs.v9.4.p191-203>. Acesso em: 26 dez. 2023.

DE SOUSA, Larissa Melo *et al.* AVALIAÇÃO DO USO E COBERTURA DA TERRA EM PARAGOMINAS E ULIANÓPOLIS-PA, UTILIZANDO DADOS DO PROJETO TERRACLASS. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 69, n. 3, 1 dez. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.14393/rbcv69n3-44339>. Acesso em: 21 ago. 2023.

DEVELOPERS. **Earth Engine Code Editor**. 2022. Disponível em: <https://developers.google.com/earth-engine/guides/playground>. Acesso em: 15 out. 2022.

DEVELOPERS. **MOD13Q1.061 Terra Vegetation Indices 16-Day Global 250m**. 2022. Disponível em: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/MODIS_061_MOD13Q1. Acesso em: 15 out. 2022.

DIDAN, Kamel *et al.* **MODIS Vegetation Index User's Guide**: version 3.00, june 2015 (collection 6). The University Of Arizona: 2015. 35 p. Disponível em: https://lpdaac.usgs.gov/documents/103/MOD13_User_Guide_V6.pdf. Acesso em: 04 out. 2022.

DIDAN, Kamel. MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V061. [S.L.], 2021. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center. <http://dx.doi.org/10.5067/MODIS/MOD13Q1.061>.

DORNELLAS, Patricia da Conceição *et al.* ANÁLISE MORFOMÉTRICA DA BACIA DO ALTO RIO PARAÍBA, REGIÃO SEMIÁRIDA DO ESTADO DA PARAIBA. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 21, n. 3, 1 jul. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.20502/rbg.v21i3.1757>. Acesso em: 21 ago. 2023.

DOS SANTOS FERREIRA, Pedro *et al.* Análise da suscetibilidade a desertificação na bacia hidrográfica do rio pontal – Pernambuco - Brasil. **Investigaciones Geográficas**, n. 53, p. 37, 25 jul. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.5354/0719-5370.2017.43270>. Acesso em: 22 ago. 2023.

DOS SANTOS, Sergio Rodrigo Quadros; CUNHA, Ana Paula Martins do Amaral; RIBEIRO-NETO, Germano Gondim. AVALIAÇÃO DE DADOS DE PRECIPITAÇÃO

PARA O MONITORAMENTO DO PADRÃO ESPAÇO-TEMPORAL DA SECA NO NORDESTE DO BRASIL. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 25, 9 ago. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.5380/abclima.v25i0.62018>. Acesso em: 21 ago. 2023.

DOS SANTOS, Thais Vieira *et al.* Teste de Mann-Kendall aplicado à dados hidrológicos – Desempenho dos filtros TFPW e CV2 na análise de tendências. **Ciência e Natura**, v. 42, p. e87, 30 dez. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/2179460x41928>. Acesso em: 21 ago. 2023.

FERREIRA, J.M.S., Ferreira, H.S., Silva, H.A., Santos, A.M., Galvíncio, J.D., 2012. Análise espaço-temporal da dinâmica da vegetação da caatinga no município de Petrolina-PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 904-922.

FRANÇA, Geraldo Victorino de. **Interpretacao fotografica de bacias e de redes de drenagem aplicada a solos da regio de piracicaba**. 1968. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1968. Acesso em: 21 ago. 2023.

FRITZSONS, Elenice; EDUARDO MANTOVANI, Luiz; SILVEIRA WREGE, Marcos. RELAÇÃO ENTRE ALTITUDE E TEMPERATURA: UMA CONTRIBUIÇÃO AO ZONEAMENTO CLIMÁTICO NO ESTADO DE SANTA CATARINA, BRASIL (RELATIONSHIP BETWEEN ALTITUDE AND TEMPERATURE: A CONTRIBUTION TO CLIMATIC ZONING FOR THE STATE OF SANTA CATARINA, BRAZIL). **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 18, 15 jul. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.5380/abclima.v18i0.39471>. Acesso em: 21 ago. 2023.

FUNK, Chris *et al.* The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. **Scientific Data**, v. 2, n. 1, dez. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>. Acesso em: 21 ago. 2023.

G, Allen R.; FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. (ed.). **Crop evapotranspiration**: Guidelines for computing crop water requirements. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998. 300 p. ISBN 9251042195.

GALVÍNCIO, Josiclêda Domiciano *et al.* Correlação linear entre a precipitação e o Índice de Área Foliar do bioma Caatinga. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 07, p. 3304, 31 dez. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.07.p3304-3314>. Acesso em: 21 ago. 2023.

GAMA, Dráuzio Correia; FERREIRA, Robério Anastácio; JESUS, Janisson Batista de. Desenvolvimento de espécies florestais nativas em mata ciliar no Riacho Grilo, Sergipe. **Advances in Forestry Science**, v. 8, n. 4, p. 1605-1612, 16 dez. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.34062/afs.v8i4.11733>. Acesso em: 21 ago. 2023.

GAMA, Dráuzio Correia; FERREIRA, Robério Anastácio; JESUS, Janisson Batista de. Desenvolvimento de espécies florestais nativas em mata ciliar no Riacho Grilo, Sergipe. **Advances in Forestry Science**, v. 8, n. 4, p. 1605-1612, 16 dez. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.34062/afs.v8i4.11733>. Acesso em: 22 ago. 2023.

GOIS, Laís Susana de Souza *et al.* CARACTERIZAÇÃO SEDIMENTOLÓGICA DOS COLÚVIOS DO MACIÇO DE MATA GRANDE – AL: UMA COMPARAÇÃO ENTRE

BREJOS DE ALTITUDE DO NORDESTE DO BRASIL. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 7, n. 1, p. 01-12, 7 jan. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.21680/2447-3359.2021v7n01id22137>. Acesso em: 21 ago. 2023.

GORELICK, Noel *et al.* Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. **Remote Sensing of Environment**, v. 202, p. 18-27, dez. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>. Acesso em: 21 ago. 2023.

HEC. HEC-HMS. 2022. Disponível em: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>. Acesso em: 02 nov. 2022.

HIRATA, Anderson Akira; BURKERT, Denilson. MORFOMETRIA DA BACIA DO RIBEIRÃO LAJEADO – SP. **Formação (Online)**, v. 27, n. 50, 16 abr. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.33081/formacao.v27i50.6449>. Acesso em: 21 ago. 2023.

HOLANDA, Francisco Sandro Rodrigues *et al.* PERCEPÇÃO DOS RIBEIRINHOS SOBRE A EROÇÃO MARGINAL E A RETIRADA DA MATA CILIAR DO RIO SÃO FRANCISCO NO SEU BAIXO CURSO. **Raega - O Espaço Geográfico em Análise**, v. 22, 26 jun. 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.5380/raega.v22i0.21773>. Acesso em: 21 ago. 2023.

HORTON, ROBERT E. EROSIONAL DEVELOPMENT OF STREAMS AND THEIR DRAINAGE BASINS; HYDROPHYSICAL APPROACH TO QUANTITATIVE MORPHOLOGY. **Geological Society of America Bulletin**, v. 56, n. 3, p. 275, 1945. Disponível em: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1945\)56\[275:edosat\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56[275:edosat]2.0.co;2). Acesso em: 21 ago. 2023.

HUANG, Senwang; KONG, Jiming. Assessing Land Degradation Dynamics and Distinguishing Human-Induced Changes from Climate Factors in the Three-North Shelter Forest Region of China. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 5, n. 9, p. 158, 2 set. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijgi5090158>. Acesso em: 21 ago. 2023.

HUETE, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v. 25, n. 3, p. 295-309, ago. 1988. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-x](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-x). Acesso em: 21 ago. 2023.

JÚNIOR, José; DANTAS, Maria. Análise do albedo da superfície e índices de vegetação por sensoriamento remoto na bacia hidrográfica do rio Pacoti/CE. **Revista Tecnologia**, v. 39, n. 2, p. 1-18, 19 dez. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.5020/23180730.2018.8132>. Acesso em: 21 ago. 2023.

KÖPPEN, Wladimir Peter. **Das geographische der Klimate**. Nendeln/Liechtenstein: Kraus Reprint, 1972. 44 p.

KOUTSIAS, N.; KARTERIS, M. Logistic regression modelling of multitemporal Thematic Mapper data for burned area mapping. **International Journal of Remote Sensing**, v. 19, n. 18, p. 3499-3514, dez. 1998. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/014311698213777>. Acesso em: 21 ago. 2023.

LI, Xijia; QU, Ying. Evaluation of Vegetation Responses to Climatic Factors and Global Vegetation Trends using GLASS LAI from 1982 to 2010. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 44, n. 4, p. 357-372, 4 jul. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/07038992.2018.1526064>. Acesso em: 22 ago. 2023.

LINS, Frederico Abraão Costa *et al.* ESTIMATIVA DE PARÂMETROS BIOFÍSICOS E EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL NO SEMIÁRIDO PERNAMBUCANO UTILIZANDO SENSORIAMENTO REMOTO. **IRRIGA**, v. 1, n. 1, p. 64-75, 2 out. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.15809/irriga.2017v1n1p64-75>. Acesso em: 21 ago. 2023.

LÖBLER, Carlos Alberto *et al.* **Geoprocessamento**, 2019. E-book. ISBN 9788533500419. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788533500419/>. Acesso em: 22 set. 2022.

LORENZZETTI, João A. **Princípios físicos de sensoriamento remoto**. Editora Blucher, 2015. E-book. ISBN 9788521208365. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521208365/>. Acesso em: 22 set. 2022.

MAGALHÃES, Adriana Guedes *et al.* Hydrological modeling of an experimental basin in the semiarid region of the Brazilian State of Pernambuco. **Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 13, n. 6, p. 1, 31 out. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2204>. Acesso em: 22 ago. 2023.

MAPBIOMAS. **MAPBIOMAS**. 2022. Disponível em: <https://mapbiomas.org/>. Acesso em: 13 out. 2022.

MARENGO, Jose A.; TORRES, Roger Rodrigues; ALVES, Lincoln Muniz. Drought in Northeast Brazil—past, present, and future. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 129, n. 3-4, p. 1189-1200, 9 jun. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1840-8>. Acesso em: 21 ago. 2023.

MARIANO, Denis A. *et al.* Use of remote sensing indicators to assess effects of drought and human-induced land degradation on ecosystem health in Northeastern Brazil. **Remote Sensing of Environment**, v. 213, p. 129-143, ago. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.04.048>. Acesso em: 22 ago. 2023.

MARINHO, Cláudia Fernanda Costa Estevam. Caracterização hídrica e morfométrica do alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba. Monografia (Especialização em Geoambiência e Recursos Hídricos do Semiárido), **Universidade Estadual da Paraíba**, Campina Grande, 67 p. 2011.

MARINHO, Danilo da Silva *et al.* Caracterização morfométrica da Sub-bacia do Rio Ribeirão, Amazônia Ocidental, Brasil. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 14, n. 2, p. e7225, 26 mar. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2021v14n2e7225>. Acesso em: 21 ago. 2023.

MELO, Roseli Freire de; VOLTOLINI, Tadeu Vinhas. **AGRICULTURA FAMILIAR dependente de chuva no Semiárido**. Brasília: Embrapa, 2019. 467 p. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/204569/1/Agricultura-familiar-dependente-de-chuva-no-semiarido-2019.pdf>. Acesso em: 22 ago. 2022.

MODIS. **MODIS Land Surface Temperature and Emissivity (MOD11)**. 2022. Disponível em: <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod11.php>. Acesso em: 13 out. 2022.

MOSCA, Andreia Arruda de Oliveira. Caracterização hidrológica de duas microbacias visando a identificação de indicadores hidrológicos para o monitoramento ambiental do manejo de florestas plantadas. 2003. **Universidade de São Paulo**, [s. l.], 2003. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11150/tde-20082003-170146/>. Acesso em: 22 ago. 2023.

OLIVEIRA JÚNIOR, José Galdino de *et al.* Space-temporal detection of environmental changes in the Brazilian semiarid through Google Earth Engine and GIS. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 127, p. 104403, jul. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104403>. Acesso em: 22 ago. 2023.

OLSZEWSKI, Nelci *et al.* Morfologia e aspectos hidrológicos da bacia hidrográfica do rio Preto, divisa dos estados do Rio de Janeiro e de Minas Gerais. **Revista Árvore**, v. 35, n. 3, p. 485-492, jun. 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0100-67622011000300011>. Acesso em: 21 ago. 2023.

PANTA, Genisson; NASCIMENTO, João Paulo da Hora; MONTEIRO, Kleython de Araújo. Eroded topography in Proterozoic Basement: the case of Capiá river watershed, Semi-arid Northeastern Brazil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 23, n. 4, p. 1929-1946, 1 out. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.20502/rbg.v23i4.2159>. Acesso em: 21 ago. 2023.

PANTALEÃO JÚNIOR, Claudio Manoel; VICENTE FERREIRA, Ricardo. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO ÍNDICE Δ NBR PARA A IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS INCENDIADAS NA MICRORREGIÃO DE UBERABA, MG. **Brazilian Geographical Journal**, v. 11, n. 2, p. 159-169, 28 dez. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.14393/bgj-v11n2-a2020-52096>. Acesso em: 21 ago. 2023.

PAREDES-TREJO, Franklin J.; BARBOSA, H. A.; LAKSHMI KUMAR, T. V. Validating CHIRPS-based satellite precipitation estimates in Northeast Brazil. **Journal of Arid Environments**, v. 139, p. 26-40, abr. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2016.12.009>. Acesso em: 21 ago. 2023.

PENG, Hanxiang; WANG, Shaoli; WANG, Xueqin. Consistency and asymptotic distribution of the Theil–Sen estimator. **Journal of Statistical Planning and Inference**, v. 138, n. 6, p. 1836-1850, jul. 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jspi.2007.06.036>. Acesso em: 21 ago. 2023.

PEREIRA, L. E. *et al.* Comparative Analysis of Normalized Difference Water Index (NDWI) Methods in Continental Wetland. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, v. 41, n. 2, p. 654-662, 20 ago. 2018. Disponível em: https://doi.org/10.11137/2018_2_654_662. Acesso em: 21 ago. 2023.

PIMENTEL, Luciene. **Hidrologia - Engenharia e Meio Ambiente**. 2015. E-book. ISBN 9788595155510. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595155510/>. Acesso em: 23 set. 2022.

PINHEIRO, Katarina Romênia *et al.* Impacto da precipitação e do uso e ocupação do solo na cobertura vegetal na Caatinga. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 5, n. 2, p. 221-231, 30 jun. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.24221/jeap.5.2.2020.3058.221-231>. Acesso em: 21 ago. 2023.

PINKAYAN, Subin. **Conditional probabilities of occurrence of wet and dry years over a large continental area**. Fort Collins, Colorado: Colorado State University, 1966.

PINTO, Vívian Gemiliano *et al.* Influência do número de classes de vulnerabilidade na determinação da suscetibilidade morfométrica à inundação. **Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 11, n. 3, p. 637, 23 jun. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1842>. Acesso em: 21 ago. 2023.

RABELO, Davi Rodrigues *et al.* Análise comparativa dos dados pluviométricos de satélite e de superfície em bacia hidrográfica semiárida. **Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto**, [S.L.], p. 63-75, 1 abr. 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5281/ZENODO.6407151>. Acesso em: 22 ago. 2023.

RÊGO, Shirley Coutinho Alves *et al.* ANÁLISE COMPARATIVA DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO NDVI E SAVI NO MUNICÍPIO DE SÃO DOMINGOS DO CARIRI-PB. **REVISTA GEONORTE**, [S. l.], v. 3, n. 5, p. 1217 –, 2012. Disponível em: [//www.periodicos.ufam.edu.br/index.php/revista-geonorte/article/view/2241](http://www.periodicos.ufam.edu.br/index.php/revista-geonorte/article/view/2241). Acesso em: 22 ago. 2023.

RODRIGUES, Rodrigo Silvano Silva *et al.* Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do Igarapé da Prata, Capitão Poço – Pará – Brasil. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 11, n. 3, p. 143, 14 ago. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.18378/rvads.v11i3.4313>. Acesso em: 21 ago. 2023.

ROSSI, MARCIO; PFEIFER, RUI MARCONI. Remoção de material erodido dos solos de pequenas bacias hidrográficas no Parque Estadual da Serra do Mar em Cubatão (SP). **Bragantia**, v. 58, n. 1, p. 141-156, 1999. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0006-87051999000100014>. Acesso em: 21 ago. 2023.

ROUSE, J. W. *et al.* Monitoring the Vernal Advancement and retrogradation (Green Wave Effect) of natural vegetation. **Greenbelt:NASA/GSFC**, 1974. 371p.

RUFINO, Iana Alexandra Alves; SILVA, Simone Tavares da. Análise das relações entre dinâmica populacional, clima e vetores de mudança no semiárido brasileiro: uma abordagem metodológica. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 23, n. 1, p. 166-181, mar. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1982-21702017000100011>. Acesso em: 8 mar. 2024.

RUNNING, Steve; MU, Qiaozhen; ZHAO, Maosheng. MODIS/Terra Net Evapotranspiration 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V061. [S.L.], 2021. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center. <http://dx.doi.org/10.5067/MODIS/MOD16A2.06>

SALIS, Hugo Henrique Cardoso *et al.* CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO CÓRREGO DO MARINHEIRO, SETE LAGOAS -

MG. **Boletim de Geografia**, v. 37, n. 2, p. 186-201, 17 abr. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.4025/bolgeogr.v37i2.36965>. Acesso em: 21 ago. 2023.

SANTOS, Cloves Vilas Boas dos *et al.* Avaliação do índice de área foliar e índice de área da planta em floresta seca utilizando modelos simplificados em imagens de alta resolução com o uso de VANT. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, v. 12, n. 3, p. 109, 21 jun. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.29150/2237-2202.2022.254276>. Acesso em: 21 ago. 2023.

SANTOS, Geovânia Ricardo dos *et al.* Análise da precipitação pluvial e temperatura do ar de Olho D'água do Casado, Delmiro Gouveia e Piranhas, Alagoas. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 3, n. 1, p. 16-27, 30 jun. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.21680/2447-3359.2017v3n1id10845>. Acesso em: 21 ago. 2023.

SANTOS, Rafael Lima Vieira dos *et al.* Yield of hybrid corn (*Zea mays* L.) AG 1051 under different plant populations under drip irrigation in Agreste Alagoano. **Revista Ambientale**, v. 12, n. 1, p. 1-9, 14 abr. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.48180/ambientale.v12i1.190>. Acesso em: 21 ago. 2023.

SCHEFF, Jacob; FRIERSON, Dargan M. W. Scaling Potential Evapotranspiration with Greenhouse Warming. **Journal of Climate**, v. 27, n. 4, p. 1539-1558, 10 fev. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/jcli-d-13-00233.1>. Acesso em: 22 ago. 2023.

SCHUMM, S. A. Sinuosity of Alluvial Rivers on the Great Plains. **Geological Society of America Bulletin**, v. 74, n. 9, p. 1089, 1963. Disponível em: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1963\)74\[1089:soarot\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1963)74[1089:soarot]2.0.co;2). Acesso em: 21 ago. 2023.

SEABRA, Vinícius da Silva *et al.* MAPEAMENTO DO USO E COBERTURA DO SOLO DA BACIA DO RIO TAPEROÁ: REGIÃO SEMIÁRIDA DO ESTADO DA PARAÍBA. **Caminhos de Geografia**, v. 15, n. 50, 13 jun. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.14393/rcg155024249>. Acesso em: 20 dez. 2023.

SEPLANDE. 2º Edição, 2021. Disponível em: https://dados.al.gov.br/catalogo/am/dataset/mapas-de-caracterizacao-territorial/resource/ec00b15f-38c9-4ec8-85fa-f93d89f8d7b8?inner_span=True. Acesso em: 29 out. 2022.

SILVA, Camilo Vinícius Trindade *et al.* CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA, USO E OCUPAÇÃO DE UMA BACIA HIDROGRÁFICA. **REVISTA ENGENHARIA NA AGRICULTURA - REVENG**, v. 25, n. 5, p. 436-444, 24 nov. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.13083/reveng.v25i5.828>. Acesso em: 21 ago. 2023.

SILVA, Carlos Batista *et al.* PRECIPITAÇÃO NA AMÉRICA DO SUL – DADOS OBTIDOS POR ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS AUTOMÁTICAS E POR SISTEMAS ORBITAIS. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 25, 9 ago. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.5380/abclima.v25i0.58813>. Acesso em: 21 ago. 2023.

SILVA, Emerson Renato Maciel da *et al.* Análise do Desempenho da Estimativa de Precipitação do Produto CHIRPS para Sub-Bacia do Rio Apeú, Castanhal-PA. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 3, p. 1094, 1 jun. 2020.

Disponível em: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.3.p1094-1105>. Acesso em: 21 ago. 2023.

SILVA, Fonseca Da Silva; SOUZA, Aline Bezerra, Detecção de Tendências Climáticas no Estado de Alagoas, Física. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 06, p. 1275–1291. 2013.

SILVA, Lywistone Galdino da; GALVÍNCIO, Josiclêda Domiciano. Análise Comparativa da Variação nos Índices NDVI e SAVI no Sítio PELD – 22, em Petrolina – PE, na Primeira Década do Século XXI (Comparative Analysis of Changes in NDVI and SAVI in PELD - 22 - Petrolina - PE, in the First Decade of the XXI Century). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 5, n. 6, p. 1446, 21 jan. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v5i6.232936>. Acesso em: 21 ago. 2023.

SILVA, Marcos Vinícius da *et al.* Spatio-temporal monitoring of soil and plant indicators under forage cactus cultivation by geoprocessing in Brazilian semi-arid region. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 107, p. 103155, abr. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103155>. Acesso em: 22 ago. 2023.

SILVA, Richarde Marques; PAIVA, Fernanda Maria De L.; SANTOS, Celso Augusto Guimarães. ANÁLISE DO GRAU DE ERODIBILIDADE E PERDAS DE SOLO NA BACIA DO RIO CAPIÁ BASEADO EM SIG E SENSORIAMENTO REMOTO. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 2, n. 1, p. 26, 10 set. 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v2i1.232618>. Acesso em: 21 ago. 2023.

SILVA, Darllan Collins da Cunha e. *et al.* Uso de Indicadores Morfométricos como Ferramentas para Avaliação de Bacias Hidrográficas (Use of Morphometric Indicators as Tools for Assessment Watershed). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 2, p. 627, 22 mar. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v9.2.p627-642>. Acesso em: 21 ago. 2023.

SMITH, K. G. Standards for grading texture of erosional topography. **American Journal of Science**, v. 248, n. 9, p. 655-668, 1 set. 1950. Disponível em: <https://doi.org/10.2475/ajs.248.9.655>. Acesso em: 21 ago. 2023.

SOUZA, Lizandra de Barros de *et al.* ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL E MAPEAMENTO DE ÁREAS CULTIVADAS EM UMA BACIA DO PROJETO DE INTEGRAÇÃO DO SÃO FRANCISCO (PISF), SEMIÁRIDO PERNAMBUCANO. **IRRIGA**, v. 26, n. 3, p. 565-583, 18 nov. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.15809/irriga.2021v26n3p565-583>. Acesso em: 22 ago. 2023.

SOUZA, Ênio Gomes Flôr *et al.* Delimitação e caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do Riacho do Navio, Pernambuco, a partir de dados SRTM processados no QGIS. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 3, p. 1530, 20 jul. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.3.p1530-1540>. Acesso em: 21 ago. 2023.

SOUZA, Carlos M. *et al.* Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine. **Remote**

Sensing, v. 12, n. 17, p. 2735, 25 ago. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs12172735>. Acesso em: 21 ago. 2023.

STEIN, R. T. **Manejo de Bacias Hidrográficas**. 2017. E-book. ISBN 9788595021259. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595021259/>. Acesso em: 23 set. 2022.

STEPHENSON, Tannecia S. *et al.* Changes in extreme temperature and precipitation in the Caribbean region, 1961–2010. **International Journal of Climatology**, v. 34, n. 9, p. 2957-2971, 13 jan. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/joc.3889>. Acesso em: 22 ago. 2023.

STRAHLER, Arthur N. Quantitative analysis of watershed geomorphology. **Transactions, American Geophysical Union**, v. 38, n. 6, p. 913, 1957. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/tr038i006p00913>. Acesso em: 21 ago. 2023.

TILGENKAMP, A. **Theil–Sen estimator**: MATLAB Central File Exchange. Disponível em: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/34308-theil-sen-estimator>. Acesso em: 16 out. 2022.

VERMOTE, Eric. MODIS/Terra Surface Reflectance 8-Day L3 Global 500m SIN Grid V061. [S.L.], 2021. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center. <http://dx.doi.org/10.5067/MODIS/MOD09A1.061>.

VILLELA, S.M., MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil. V. 245. 1975.

WAN, Zhengming; HOOK, Simon; HULLEY, Glynn. MODIS/Terra Land Surface Temperature/Emissivity Daily L3 Global 1km SIN Grid V061. [S.L.], 2021. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center. <http://dx.doi.org/10.5067/MODIS/MOD11A1.061>.

XIMENES, Luciano Feijão; SILVA, Maria Sonia Lopes da; BRITO, Luiza Teixeira de Lima. **Tecnologias de Convivência com o Semiárido BRASIL**. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, 2019. 1138 p. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/205051/1/Tecnologias-de-Convivencia-com-o-Semiarido-Brasileiro-2019.pdf>. Acesso em: 22 ago. 2022.

XU, Hanqiu. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v. 27, n. 14, p. 3025-3033, 20 jul. 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>. Acesso em: 21 ago. 2023.

ZHA, Y.; GAO, J.; NI, S. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v. 24, n. 3, p. 583-594, jan. 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01431160304987>. Acesso em: 21 ago. 2023.

ZHAO, Qiang *et al.* Progress and Trends in the Application of Google Earth and Google Earth Engine. **Remote Sensing**, v. 13, n. 18, p. 3778, 21 set. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs13183778>. Acesso em: 21 ago. 2023.

