



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE FILOSOFIA E CIÊNCIAS HUMANAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO E MEIO AMBIENTE

JULIANA PATRÍCIA FERNANDES GUEDES BARROS

**DEMANDA E DISPONIBILIDADE HÍDRICA PARA AGRICULTURA NO
SEMIÁRIDO DO NORDESTE BRASILEIRO: análise da Área de Influência Direta
do Eixo Leste da Transposição do Rio São Francisco**

Recife
2025

JULIANA PATRÍCIA FERNANDES GUEDES BARROS

**DEMANDA E DISPONIBILIDADE HÍDRICA PARA AGRICULTURA NO
SEMIÁRIDO DO NORDESTE BRASILEIRO: análise da Área de Influência Direta
do Eixo Leste da Transposição do Rio São Francisco**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Desenvolvimento e Meio Ambiente. Área de concentração: Gestão e Políticas Ambientais.

Orientadora: Josicleda Domiciano Galvinctio

Coorientadora: Magna Soelma Beserra De Moura

Recife

2025

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Barros, Juliana Patricia Fernandes Guedes.

Demanda e disponibilidade hídrica para agricultura no semiárido do nordeste brasileiro: análise da Área de Influência Direta do Eixo Leste da Transposição do Rio São Francisco / Juliana Patricia Fernandes Guedes Barros. - Recife, 2025. 136f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, 2025.

Orientação: Josiclêda Domiciano Galvêncio.

Coorientação: Magna Soelma Beserra de Moura.

Inclui referências.

1. Agricultura; 2. Escassez Hídrica; 3. Gestão da Água; 4. Evapotranspiração; 5. Modelagem Hidrológica. I. Galvêncio, Josiclêda Domiciano. II. Moura, Magna Soelma Beserra de. III. Título.

UFPE-Biblioteca Central

JULIANA PATRÍCIA FERNANDES GUEDES BARROS

**DEMANDA E DISPONIBILIDADE HÍDRICA PARA AGRICULTURA NO
SEMIÁRIDO DO NORDESTE BRASILEIRO: análise da Área de Influência Direta
do Eixo Leste da Transposição do Rio São Francisco**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Desenvolvimento e Meio Ambiente. Área de concentração: Gestão e Políticas Ambientais.

Aprovado em: ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Josiclêda Domiciano Galvêncio (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Prof^a. Dr^a. Luciana Mayla de Aquino França
Prefeitura da Cidade do Recife

Prof^a. Dr^a. Rejane Magalhães de Mendonça Pimentel
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Prof^a. Dr^a. Werônica Meira de Souza
Universidade Federal do Agreste de Pernambuco

*À minha família,
Por ser meu pilar durante toda a jornada.*

Agradecimentos

Aos meus pais, Cleiton Barros e Vilmone Guedes, por sempre estarem ao meu lado. Devo cada conquista ao sacrifício e aos esforços deles ao longo de minha vida. Agradeço por nunca me deixarem desistir, pelos conselhos e pelo colo nos momentos necessários. À minha irmã, Thais Guedes, minha maior amiga, pelo apoio incondicional, pela escuta atenta e pelas palavras de incentivo. Ao meu cachorro, Marley, por sua companhia, por me animar nos dias difíceis e por sempre estar por perto, seja me acordando de manhã ou cochilando ao meu lado à noite. Agradeço por sempre estarem ao meu lado e por acreditarem nos meus sonhos. Divido e devo cada uma das minhas realizações à minha família; sem eles, nada seria possível.

A Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio financeiro para a realização desta pesquisa.

À minha orientadora, Josiclêda Galvêncio, uma profissional ímpar e de enorme humanidade, agradeço pela paciência, dedicação e as valiosas contribuições em todas as etapas deste trabalho. Seu incentivo foi fundamental para meu crescimento acadêmico e pessoal, especialmente por acreditar em meu potencial mesmo quando eu duvidei de mim mesma.

À minha coorientadora, Magna Moura, pelo apoio constante e pelas ideias enriquecedoras, que ampliaram os horizontes deste estudo.

Aos membros do Laboratório de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento - SERGEO, agradeço imensamente pela solicitude, apoio constante e por todos os conhecimentos compartilhados.

A todo o corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente (PRODEMA), que me acolheu ao longo de todo o período do mestrado e foi fundamental para o desenvolvimento desta pesquisa. Em especial, às professoras Solange Laurentino e Rejane Pimentel, pelo apoio incondicional e pelos valiosos ensinamentos, que ajudaram a suavizar os desafios da jornada acadêmica e a me guiar nos momentos mais difíceis.

Aos amigos que fiz ao longo dos últimos dois anos e àqueles que me acompanham desde o início da graduação, minha profunda gratidão pelo apoio e companheirismo. Mesmo nos momentos em que precisei me afastar para me reencontrar, vocês permaneceram ao meu lado, oferecendo suporte e amizade. Cada um de vocês foi essencial para que eu chegasse até aqui. Minha sincera gratidão para Alessandra Santana, Ana Vitória, Camila Bandim, Gabriel Soares, Janete Nascimento,

Lívia Ferreira, Thainá Caetano e Vanessa Pereira, meus eternos Ícones Geográficos, que caminham comigo desde a graduação. Um agradecimento especial à Manuela Laurentino, que conheci no mestrado e, ao longo desses dois anos de desafios e conquistas, esteve sempre presente, oferecendo escuta, apoio e amizade. Sou imensamente grata pela presença dos meus amigos em minha vida, por tornarem meus dias mais leves e por me lembrarem que nunca estou sozinha, mesmo nos momentos mais difíceis. A todos que, de alguma forma, contribuíram para minha trajetória acadêmica e pessoal, meus mais sinceros agradecimentos.

Por fim, agradeço a quem eu era, sou, serei. A cada fragmento de mim responsável por construir este trabalho. Talvez a Juliana que deu início a essa jornada não acreditasse que chegaríamos até aqui, o “eu” do presente ainda está incrédulo com tal feito. No fim, de alguma forma, superamos nosso *it*.

À Juliana do futuro: talvez nossa utopia permaneça um sonho intangível. Talvez você não se transforme magicamente quando o relógio marcar meia-noite. Mas aproveite o desconforto de viver e sempre dê tudo de si, independentemente do que isso signifique.

Sim, quero a palavra última que também é tão primeira que já se confunde com a parte intangível do real. Ainda tenho medo de me afastar da lógica porque caio no instintivo e no direto, e no futuro: a invenção do hoje é o meu único meio de instaurar o futuro.

Clarice Lispector, Água Viva, 1973.

RESUMO

A crescente demanda por água, impulsionada pelo crescimento populacional, urbanização e expansão agrícola, tem agravado o estresse hídrico em escala global, especialmente em regiões com baixos indicadores socioeconômicos. No Semiárido do Nordeste brasileiro, a agricultura enfrenta desafios severos devido à irregularidade das chuvas e aos efeitos das mudanças climáticas. Neste contexto, o Projeto de Integração do Rio São Francisco (PISF) visa ampliar a disponibilidade hídrica, mas levanta questões quanto ao uso sustentável e à equidade na distribuição da água. Nesse sentido, o estudo objetivou avaliar a disponibilidade e demanda pelo uso de água para a agricultura na Área de Influência Direta (AID) do Eixo Leste da transposição do Rio São Francisco (PISF). Utilizou-se o modelo hidrológico SUPPer para estimar o balanço hídrico e simular cenários de mudanças climáticas, com foco na umidade do solo e na disponibilidade hídrica. A análise da demanda hídrica foi realizada com imagens dos sensores OLI (Landsat 8) e TM (Landsat 5), dos anos de 1985, 2005 e 2023, investigando alterações na cobertura vegetal e na resposta evaporativa. Os resultados indicam aumento das vulnerabilidades ligadas à agricultura na AID, com aumento da demanda hídrica em áreas irrigadas e agravamento dos conflitos pelo uso da água. A umidade do solo média mensal não ultrapassa 3 mm, evidenciando déficit hídrico generalizado, com destaque para as sub-bacias da bacia hidrográfica do rio Moxotó, que apresentaram os piores índices, sobretudo sob cenários de alteração climática. Também foi constatada perda de cobertura vegetal da Caatinga e expansão de áreas com solo exposto, associadas à maior variabilidade da energia disponível na superfície. O cenário reforça a necessidade de políticas públicas que conciliem a expansão agrícola com a segurança hídrica e a preservação ambiental no Semiárido, reconhecendo que a agricultura é tanto vítima quanto uma importante medida adaptativa para enfrentamento da escassez hídrica e dos eventos extremos.

Palavras-chave: agricultura; escassez hídrica; gestão da água; evapotranspiração; modelagem hidrológica.

ABSTRACT

The growing demand for water, driven by population growth, urbanization, and agricultural expansion, has intensified water stress on a global scale, especially in regions with low socioeconomic indicators. In the Semi-arid region of Northeastern Brazil, agriculture faces severe challenges due to rainfall irregularity and the effects of climate change. In this context, the São Francisco River Integration Project (PISF) aims to increase water availability but raises concerns regarding sustainable use and equitable distribution of water resources. This study aimed to assess water availability and demand for agricultural use in the Direct Influence Area (AID) of the Eastern Axis of the São Francisco River transposition (PISF). The SUPeR hydrological model was used to estimate the water balance and simulate climate change scenarios, focusing on soil moisture and water availability. Water demand was analyzed using images from the OLI (Landsat 8) and TM (Landsat 5) sensors, from the years 1985, 2005, and 2023, examining changes in vegetation cover and evaporative response. The results indicate increasing agricultural vulnerability in the AID, with higher water demand in irrigated areas and worsening conflicts over water use. Average monthly soil moisture does not exceed 3 mm, revealing widespread water deficit, especially in sub-basins of the Moxotó River basin, which showed the lowest indices, particularly under climate change scenarios. A loss of Caatinga vegetation cover and an expansion of exposed soil areas were also observed, associated with greater variability in surface energy availability. This scenario reinforces the need for public policies that reconcile agricultural expansion with water security and environmental conservation in the semi-arid region, recognizing that agriculture is both a victim of water scarcity and a key adaptive strategy in the face of extreme events.

Keywords: agriculture; water scarcity; water management; evapotranspiration; hydrological modeling.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: representação dos componentes da evapotranspiração (ET).....	28
Figura 2: Localização da Área de Influência Direta do Projeto de transposição do rio São Francisco no Estado de Pernambuco	35
Figura 3: Precipitação média mensal no período entre 1960 e 2023 nos municípios de Floresta, Custódia e Sertânia, em Pernambuco	37
Figura 4: hipsometria da Área de Influência Direta do Projeto de Transposição do Rio São Francisco.....	38
Figura 5: Declividade da Área de Influência Direta do Projeto de Transposição do Rio São Francisco.....	39
Figura 6: classes de solo daÁrea de Influência Direta do Projeto de Transposição do Rio São Francisco	40
Figura 7: Uso e ocupação do solo para o ano de 2022 da Área de Influência Direta do Projeto de Transposição do Rio São Francisco	42
Figura 8: Localização dos reservatórios do Projeto de Transposição do Rio São Francisco inseridos dentro do estado de Pernambuco	44
Figura 9: Localização das sub-bacias dentro da Área de Influência Direta do Projeto de Transposição do Rio São Francisco no Estado de Pernambuco.....	47
Figura 10: Representação do balanço hídrico de referência das sub-bacias.....	64
Figura 11: Médias mensais históricas de precipitação nas Sub-bacias para o cenário de Referência de 1966 a 2024	67
Figura 12: Médias mensais históricas de escoamento superficial nas Sub-bacias para o cenário de Referência de 1966 a 2024Médias mensais históricas de escoamento superficial nas Sub-bacias para o cenário de Referência de 1966 a 2024.....	71
Figura 13: Balanço Hídrico Simulado nas Sub-bacias: Comparação entre o Cenário Atual e o Cenário com +2,5 °C e -22% de Precipitação.....	75
Figura 14: Comparação percentual entre fluxos de escoamento, evapotranspiração e percolação nas sub-bacias.....	76
Figura 15: comparação da precipitação mensal para as sub-bacias da bacia hidrográfica do rio Pajeú nos Cenários de Referência e de Mudanças Climáticas	79
Figura 16: comparação da precipitação mensal para as sub-bacias da bacia hidrográfica do rio Moxotó nos Cenários de Referência e de Mudanças Climáticas .	80

Figura 17: Distribuição da Umidade do Solo mensal nas Sub-bacias considerando o cenário de referência.....	84
Figura 18: Médias mensais históricas de Umidade do Solo nas Sub-bacias para o cenário de Referência.....	85
Figura 19: Distribuição da Umidade do Solo nas Sub-bacias para o cenário de mudanças climáticas.....	87
Figura 20: Médias mensais históricas de Umidade do Solo nas Sub-bacias considerando o cenário de mudanças climáticas.....	88
Figura 21: Índice de Vegetação Ajustado do Solo nas cenas Landsat que abrangem a Área de Influência Direta do Projeto de Transposição do Rio São Francisco em 1985	91
Figura 22: Índice de Vegetação Ajustado do Solo nas cenas Landsat que abrangem a Área de Influência Direta do Projeto de Transposição do Rio São Francisco em 2005	91
Figura 23: Índice de Vegetação Ajustado do Solo nas cenas Landsat que abrangem a Área de Influência Direta do Projeto de Transposição do Rio São Francisco em 2023	92
Figura 24: Saldo de radiação ($W\ m^{-2}$) nas cenas Landsat que abrangem a Área de Influência Direta do Projeto de Transposição do Rio São Francisco em 1985	100
Figura 25: Saldo de radiação ($W\ m^{-2}$) nas cenas Landsat que abrangem a Área de Influência Direta do Projeto de Transposição do Rio São Francisco em 2005	101
Figura 26: Saldo de radiação ($W\ m^{-2}$) nas cenas Landsat que abrangem a Área de Influência Direta do Projeto de Transposição do Rio São Francisco em 2023	101
Figura 27: Evapotranspiração diária (mm/dia) nas cenas Landsat que abrangem a Área de Influência Direta do Projeto de Transposição do Rio São Francisco em 2023	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores estatísticos mínimo, máximo, média e desvio padrão obtidos na para o Índice de Vegetação Ajustado do Solo (SAVI) para as datas das cenas landsat ...	98
Tabela 2: Valores estatísticos mínimo, máximo, média e desvio padrão obtidos na para o Saldo de Radiação (R_n) em W/m^2 , para as datas das cenas landsat	105
Tabela 3: Dados de velocidade do vento no horário de passagem da imagem de satélite e soma da radiação global diária para o dia da imagem de satélite	111
Tabela 4: Valores estatísticos mínimo, máximo, média e desvio padrão obtidos na para a evapotranspiração diária, expressa em mm/dia, para as datas das cenas landsat	112
Tabela 5: Produtos das lavouras temporárias por município para o ano de 2023 ...	113
Tabela 6: Produtos das lavouras permanente por município para o ano de 2023 ...	114

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Informações das Sub-Bacias e Reservatórios nas Bacias do Rio Pajeú e Rio Moxotó.....	46
Quadro 2: Informações das imagens Landsat utilizadas no estudo.....	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADA	Área Diretamente Afetada
AID	Área de Influência Direta
All	Área de Influência Indireta
AMS	American Meteorological Society
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
ASCE	American Society of Civil Engineers Environmental and Water Resources
EWRI	Institute
Bdmep	Banco de Dados Meteorológicos do Instituto Nacional de Meteorologia
BEST	Brazilian Ecohydrological Simulation Tool
CC	Capacidade de Campo
ET	Evapotranspiração
ETc	Evapotranspiração de Cultura
ETd	Evapotranspiração Diária
FAO	Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação
HAWQS	Hydrologic and Water Quality System
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
ITEP	Instituto de Tecnologia de Pernambuco
Kc	Coeficiente de Cultura
MI	Ministério da Integração Nacional
NIDIS	National Integrated Drought Information System
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
	Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do
PISF	Nordeste Setentrional
PMP	Ponto de Murcha Permanente
PNSH	Plano Nacional de Segurança Hídrica
PREC	Percolação
RL	Neossolos Litólicos
SEBAL	Surface Energy Balance Algorithm for Land
SUPer	Sistema de Unidades de Resposta Hidrológica para Pernambuco
SURQ	Fluxo de escoamento
SW	Umidade do Solo
SWAT	Soil and Water Assessment Tool
TC	Luvissolos Crômicos
URHs	Unidades de Respostas Hidrológicas

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 Objetivos.....	19
1.1.1 Objetivo Geral	19
1.1.2 Objetivos Específicos.....	20
 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 Demanda e disponibilidade hídrica na agricultura	21
2.2 Modelagem hidrológica e disponibilidade hídrica	22
2.3 Importância da umidade do solo na agricultura	24
2.4 Sensoriamento remoto aplicado à estimativa de Evapotranspiração	27
2.5 Regulamentação e Políticas Públicas na gestão agrícola e da água.....	30
 3 MATERIAL E MÉTODOS	35
3.1 Caracterização da área de estudo.....	35
3.1.1 Clima e Relevo.....	36
3.1.2 Solos.....	39
3.1.3 Uso e ocupação do solo	41
3.1.4 Hidrografia	43
3.2 Procedimentos Metodológicos	45
3.2.1 Modelagem hidrológica.....	45
3.2.1.1 <i>Cenários de mudanças climáticas</i>	48
3.2.1.2 <i>Avaliação da umidade do solo</i>	49
3.2.2 Cálculo da evapotranspiração diária utilizando o modelo SEBAL.....	50
3.2.2.1 <i>Obtenção das imagens de satélite</i>	50
3.2.2.2 <i>Obtenção dos dados climáticos</i>	51
3.2.2.3 <i>Pré-processamento das cenas do Landsat 5 e 8</i>	52
3.2.2.4 <i>Cálculo dos Componentes do Balanço de Energia</i>	53
 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	62
4. 1 Balanço hídrico médio mensal nas sub-bacias	62
4.1.1 Cenário de mudanças climáticas para o balanço hídrico.....	73
4.1.2 Avaliação da umidade do solo.....	82
4.1.2.1 <i>Cenário de referência (Ref) da umidade do solo</i>	83
4.1.2.2 <i>Cenário de mudanças climáticas (Cen1) da umidade do solo</i>	86

4.2 Avaliação espaço-temporal da resposta do balanço de energia e dos índices de vegetação	90
4.2.1 Mudanças na Cobertura vegetal	90
4.2.2 Saldo de radiação (Rn).....	100
4.2.3 Evapotranspiração diária (ETd).....	106
4.3 Avaliação da produção agrícola na AID e impactos do Déficit Hídrico	113
 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	 118
REFERÊNCIAS	121

1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional acelerado, a urbanização e a expansão industrial têm elevado a demanda por água em todo o mundo. Segundo a UNESCO (2023), nos últimos 40 anos o uso da água cresceu 1% ao ano. Os países subdesenvolvidos, cuja população possui baixos indicadores socioeconômicos, são os mais afetados pelo aumento da demanda (UNESCO, 2023). A agricultura é responsável por aproximadamente 70% do consumo global de água, seguida pela indústria (20%) e pelo uso doméstico (12%). O consumo excessivo, aliado a práticas insustentáveis, tem levado a um cenário crítico de estresse hídrico em diversas regiões do planeta. Aproximadamente metade da população mundial enfrenta grave escassez de água por parte do ano, e um quarto da população mundial vive sob estresse hídrico extremo, utilizando mais de 80% do seu suprimento anual de água doce renovável (IPCC, 2023; UNESCO, 2024).

Esses desafios são ainda mais críticos em regiões áridas e semiáridas, como o Semiárido do Nordeste brasileiro, caracterizado por chuvas irregulares, altas taxas de evapotranspiração e temperaturas elevadas, levando a região a enfrentar grave vulnerabilidade hídrica. Com uma população de 22,6 milhões de habitantes e a menor disponibilidade hídrica do país, o Semiárido representa um dos cenários mais desafiadores para a gestão de recursos hídricos no Brasil (ANA, 2022; Brasil, 2012). Apesar das condições adversas, o Nordeste concentra 18,8% das áreas irrigadas do país, ocupando o terceiro lugar nacional (IBGE, 2019). No entanto, as projeções de mudanças climáticas indicam o aumento na frequência e na duração das secas, o prolongamento dos veranicos e a redução do volume de chuvas, intensificando os desafios para a agricultura e a segurança alimentar (Lacerda *et al.*, 2009; Marengo, Cunha e Alves, 2016). Nesse contexto, o monitoramento contínuo e a gestão eficiente dos recursos hídricos são essenciais para assegurar o acesso à água e sua preservação para as futuras gerações (IPCC, 2023; UNESCO, 2024).

Diante dos desafios hídricos no Semiárido brasileiro, o sensoriamento remoto e a modelagem hidrológica são estratégias essenciais para fortalecer a resiliência ambiental e o desenvolvimento sustentável, considerando a importância da agricultura para a economia da região (Olivera-Guerra, Merlin e Er-Raki, 2020; Aryalekshmi *et al.*, 2021). A ampliação da oferta de água pelo Projeto de Integração do Rio São Francisco (PISF) (MI, 2018) tem transformado o cenário hídrico da região, com impactos diretos

sobre a disponibilidade e a demanda hídrica. Nesse contexto, os reservatórios construídos ao longo do Eixo Leste assumem um papel estratégico, não apenas no armazenamento e regulação hídrica, mas também como elementos fundamentais para o desenvolvimento socioeconômico da região. Mady *et al.* (2020) ressaltam que, em regiões semiáridas, reservatórios são essenciais para garantir a segurança hídrica e viabilizar a produção agrícola, reduzindo a vulnerabilidade das comunidades rurais à mudança climática. No entanto, a maior disponibilidade hídrica, apesar de crucial, também traz consigo desafios relacionados ao uso sustentável e à equidade na distribuição dos recursos hídricos. A adução de água para áreas historicamente afetadas pela escassez e irregularidade das chuvas impacta diretamente o setor agrícola na Área de Influência Direta (AID) do PISF e intensifica os conflitos ambientais pelo uso da água, presentes nas regiões beneficiadas pelo projeto (Silva *et al.*, 2015; Maia *et al.*, 2024).

Nesse contexto, a modelagem hidrológica surge como uma ferramenta essencial para compreender e prever os processos que afetam o ciclo da água em bacias hidrográficas. Modelos como o *Soil & Water Assessment Tool* (SWAT) permitem simular o balanço hídrico, avaliando diferentes cenários e a influência das alterações ambientais sobre os recursos hídricos (Arnold *et al.*, 2012), em especial, considerando a expansão da usabilidade do SWAT a partir do Sistema de Unidades de Resposta Hidrológica para Pernambuco (SUPeR) no Estado de Pernambuco (Viana *et al.*, 2020). A estimativa do balanço hídrico é de extrema importância, especialmente em regiões como o Nordeste do Brasil, onde as condições climáticas e a agricultura de subsistência, com baixa tecnologia, comprometem a produtividade das culturas. Com base no balanço hídrico, é possível planejar adequadamente a quantidade de água necessária para atender as demandas, contribuindo para uma gestão eficiente dos recursos hídricos e para o planejamento para usos eficientes da água direcionada ao uso agrícola (HIDROBR, 2022).

Além da modelagem hidrológica, o sensoriamento remoto tem se mostrado uma ferramenta poderosa para estimar a evapotranspiração, utilizando imagens de satélite e modelos como o *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (SEBAL), que avaliam o balanço de energia da superfície e fornecem informações detalhadas sobre as perdas de água por evapotranspiração, destacando-se como uma ferramenta crucial para fornecer subsídios no planejamento e gestão dos recursos hídricos (Bastiaanssen, 1998; Medeiros, 2021). Aryalekshmi *et al.* (2021), destacam a

importância das estimativas de evapotranspiração para o estudo da agricultura, climatologia e hidrologia focada na estimativa das necessidades hídricas das culturas, do estresse hídrico, do escoamento superficial, do planejamento da irrigação, secas e da avaliação do balanço hídrico. Na região do São Francisco, Teixeira *et al.* (2008) destacam que o conhecimento adequado da evapotranspiração é crucial para enfrentar os desafios da gestão hídrica. A região enfrenta a crescente escassez de água, com a competição entre usuários, superexploração dos recursos hídricos, além das mudanças climáticas e das transformações no uso da terra, que intensificam a pressão sobre os recursos naturais. A evapotranspiração, um dos processos centrais do ciclo hidrológico, representa a principal via de perda de água para a atmosfera. Compreender seu comportamento é crucial para o manejo sustentável dos recursos hídricos, especialmente em regiões que enfrentam problemáticas ligadas à escassez dos recursos hídricos (Santos, 2020).

Diante das vulnerabilidades climáticas e da crescente competição pelo uso da água, uma gestão mais eficiente dos recursos hídricos nas áreas de influência da transposição do Rio São Francisco torna-se urgente. Nesse contexto, ferramentas como a modelagem hidrológica e o sensoriamento remoto são fundamentais para compreender a dinâmica dos recursos hídricos e para subsidiar políticas públicas que promovam a sustentabilidade e a segurança hídrica (Castro, 2018; Sobrinho, 2023). A ação climática e a sustentabilidade da água estão intrinsecamente ligadas, onde a agricultura é tanto vítima, quanto uma medida adaptativa crucial para enfrentar a escassez hídrica e eventos extremos (ANA, 2021). Dialogando diretamente com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente o ODS 6 (água potável e saneamento), o ODS 13 (ação contra a mudança global do clima) e o ODS 2 (fome zero e agricultura sustentável), ao reforçar a importância de políticas integradas que assegurem o uso sustentável da água, a resiliência climática e a segurança alimentar nas regiões semiáridas.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a demanda pelo uso de água para a agricultura no Semiárido Pernambucano, discutindo a relação entre demanda e disponibilidade hídrica, bem

como a segurança hídrica frente às mudanças climáticas na Área de Influência Direta (AID) do Eixo Leste da transposição do Rio São Francisco (PISF).

1.1.2 Objetivos Específicos

- Determinar o balanço hídrico nos Portais de entrega do Eixo Leste da transposição do Rio São Francisco, relacionando com o uso do solo e as influências na demanda hídrica;
- Projetar cenários de mudanças climáticas para os Portais de entrega do Eixo Leste da transposição do Rio São Francisco;
- Avaliar a umidade do solo e estimar a evapotranspiração na Área de Influência Direta (AID) do Eixo Leste da transposição do Rio São Francisco (PISF).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Demanda e disponibilidade hídrica na agricultura

A disponibilidade e a demanda hídrica são conceitos chave para a gestão dos recursos hídricos, sobretudo em regiões semiáridas onde a escassez afeta os diferentes usos da água e gera vulnerabilidades socioeconômicas. No semiárido, a limitada disponibilidade hídrica é um obstáculo significativo para o desenvolvimento de atividades econômicas e produtivas (Fechine e Galvêncio, 2014).

A disponibilidade hídrica se refere ao balanço entre a quantidade de água disponível e o volume demandado pelos diferentes usos consultivos (Branco, 2016). Em relação a demanda hídrica, o conceito refere-se à estimativa da vazão de retirada, ou seja, à quantidade de água captada destinada a atender várias finalidades de consumo (ANA, 2022). O balanço entre a disponibilidade e a demanda hídrica constitui a base para o conceito de segurança hídrica. A definição amplamente utilizada foi proposta em 2013 pela ONU. Em linhas gerais, a ONU define o termo como a capacidade de uma população em salvaguardar acesso sustentável à água de qualidade, garantindo sobrevivência, bem-estar humano, desenvolvimento socioeconômico, proteção contra poluição e desastres relacionados à água, bem como a preservação de ecossistemas em um ambiente de paz e estabilidade política (UN WATER, 2013).

No semiárido o desenvolvimento agrícola envolve as condições climáticas e a baixa disponibilidade hídrica natural da região, propulsoras de vulnerabilidades e escassez. De acordo com a FAO (2012), a escassez hídrica refere-se ao desequilíbrio entre a disponibilidade de água e sua demanda. Duas dimensões são contempladas pelo conceito: a escassez de disponibilidade, relativa à falta de água de qualidade para atender a demanda dos diferentes usos, e a escassez econômica, que abrange a falta de infraestrutura, envolvendo as questões socioeconômicas e técnicas, além de falhas das instituições responsáveis.

A vulnerabilidade da população residente no semiárido é drasticamente afetada por tais questões, em especial a agricultura de sequeiro, atividade econômica de maior abrangência no semiárido, condicionada pelo volume e distribuição de precipitações na manutenção da lavoura. Devido à dependência dos padrões de precipitação, a vulnerabilidade desse manejo é acentuada, resultando em maior

competição pelo uso da água entre a agricultura e outros setores. Anualmente, o déficit hídrico chega a 37% (ANA, 2020).

No que se refere à agricultura irrigada, o semiárido brasileiro está intimamente ligado à questão da disponibilidade e demanda hídrica, merecendo destaque devido ao alto consumo de água exigido por culturas agrícolas sob regime de irrigação. Segundo a 2ª edição do Atlas de Irrigação da ANA, os polos nacionais de agricultura irrigada, especialmente os que utilizam pivôs centrais, representam a principal fronteira atual e futura da irrigação no Brasil (ANA, 2021). Polos importantes de desenvolvimento agrícola, como os situados no Vale do São Francisco (Polo de irrigação Petrolina/Juazeiro), têm se beneficiado da irrigação como uma ferramenta para aumentar a produtividade e garantir a segurança alimentar, mesmo em condições adversas. A irrigação possibilita o cultivo de uma variedade de produtos ao longo do ano, contribuindo significativamente para o desenvolvimento econômico da região. No entanto, essa prática também intensifica a demanda hídrica, exigindo uma gestão eficiente dos recursos disponíveis para evitar a sobre-exploração. Como apontam Almeida, Almeida e Oliveira (2021), uma gestão hídrica eficiente é essencial para o desenvolvimento sustentável no semiárido, dada a fragilidade do bioma Caatinga, que é vulnerável à desertificação devido a condições climáticas, de solo e à exploração irregular dos recursos naturais. Portanto, é crucial que a gestão dos recursos hídricos na agricultura seja adequada, pois a falta de planejamento pode resultar em degradação do solo e escassez hídrica.

2.2 Modelagem hidrológica e disponibilidade hídrica

A modelagem hidrológica é uma ferramenta essencial para a compreensão e previsão dos processos que influenciam o ciclo da água em uma bacia hidrográfica. Envolve a utilização de modelos matemáticos e computacionais para simular o comportamento dos recursos hídricos, como a precipitação, a evapotranspiração, o escoamento superficial e a infiltração. A modelagem dá suporte na avaliação da disponibilidade hídrica, na previsão de eventos extremos e na gestão sustentável dos recursos hídricos (Viana *et al.*, 2020). Segundo Rennó e Soares (2003) um modelo hidrológico é definido como uma representação matemática que simula o fluxo de água e seus constituintes sobre a superfície e/ou subsuperfície terrestre. A bacia hidrográfica, que é a unidade espacial mais comum para a aplicação desses modelos, compreende as áreas que captam e liberam água em um ou mais canais de

escoamento, que eventualmente desembocam em uma única saída. Dependendo do objetivo do estudo, a bacia pode ser tratada como uma unidade agregada, considerando suas propriedades médias, ou pode ser subdividida em várias partes para refletir características espacialmente distribuídas (Medeiros, 2018).

A modelagem hidrológica é aplicada em diversas áreas, incluindo o planejamento e gestão de recursos hídricos, a avaliação de impactos ambientais, e a projeção de cenários de mudanças climáticas (Marques; Veras e Rodríguez, 2022). A escolha do modelo adequado depende das características da região de estudo, dos objetivos da análise e dos dados disponíveis. Modelos hidrológicos podem ser classificados em modelos conceituais, que utilizam representações simplificadas dos processos hidrológicos, e modelos físicos, que baseiam suas simulações em princípios físicos e equações diferenciais (Rennó e Soares, 2003). O *Soil & Water Assessment Tool* (SWAT) é um modelo semi-distribuído complexo baseado em processos físicos, amplamente utilizado para avaliações hidrológicas e aplicações ambientais em todo o mundo e no Brasil (Arnold *et al.*, 1998; Arnold *et al.*, 2012; Bressiani *et al.*, 2023).

Modelos hidrológicos têm sido desenvolvidos com base na ferramenta SWAT. O *Hydrologic and Water Quality System* (HAWQS) (hawqs.tamu.edu/#/) é um sistema de modelagem de quantidade e qualidade da água para os Estados Unidos, que possibilita o desenvolvimento e execução de estudos sobre bacias hidrográficas americanas (HAWQS, 2020). No Brasil, com base no HAWQS e utilizando o SWAT, foi criado o Sistema de Unidades de Resposta Hidrológica para Pernambuco (SUPer) (super.hawqs.tamu.edu/). O projeto é fruto de uma colaboração multiinstitucional entre a Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), a Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), a Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), o Instituto de Tecnologia de Pernambuco (ITEP) e a Texas A&M University. O SUPer calibrou o modelo SWAT para as treze principais sub-bacias hidrográficas do estado de Pernambuco.

O sistema foi desenvolvido para ampliar a usabilidade do SWAT, e, é uma ferramenta crucial para a gestão dos recursos hídricos de Pernambuco. O SUPer permite a simulação dos efeitos das práticas de manejo em diferentes tipos de culturas, solos, coberturas vegetais, usos do solo e cenários de mudanças climáticas. Assim, o SUPer contribui para a análise da hidrologia, da qualidade da água e da produção de sedimentos em bacias hidrográficas do estado (Viana *et al.*, 2020).

Importantes pesquisas têm sido realizadas utilizando a ferramenta SUPer para diversas finalidades, especialmente na região semiárida, onde o sistema tem sido fundamental em estudos relacionados à gestão e disponibilidade hídrica, mudanças climáticas e qualidade de água (Freire-Silva *et al.*, 2022; Soares, 2023; Luz e Galvêncio, 2022; Galvêncio; Miranda e Luz, 2024; Tiburcio *et al.*, 2023; Santos *et al.*, 2023; Silveira *et al.*, 2022; Barros *et al.*, 2023). Além disso, há perspectivas de atualização e expansão do projeto para todo o Brasil. O *Brazilian Ecohydrological Simulation Tool* (BEST) é uma extensão da experiência adquirida com o SUPer em Pernambuco (Bressiani *et al.*, 2023). O BEST é um modelo colaborativo web destinado à gestão de bacias hidrográficas e, como ponto de partida, foram inseridas na plataforma bacias calibradas dos rios Piracicaba, Jaguaribe e São Francisco, além de um setup para a modelagem hidrológica de todo o Brasil sem calibração.

2.3 Importância da umidade do solo na agricultura

A umidade do solo (SW) desempenha um papel crucial no monitoramento agrícola e na gestão dos recursos naturais, pois afeta a previsão de secas e inundações, incêndios florestais e o suprimento de água (Han *et al.*, 2023; NIDIS, 2024). Definida pelo Glossário de Meteorologia da *American Meteorological Society* (AMS) como "a quantidade total de água, incluindo o vapor de água, em um solo não saturado", a SW inclui a água armazenada nos poros do solo, que não está em rios, lagos ou águas subterrâneas (Seneviratne *et al.*, 2010). Esse nível é influenciado por condições climáticas, tipo de solo e vegetação e impacta a dinâmica do solo e das plantas. A umidade da superfície do solo refere-se à água nos 10 cm superiores, enquanto a umidade da zona radicular abrange a água disponível para as plantas nos 200 cm superiores do solo (NIDIS, 2024).

Myeni, Moeletsi e Clulow (2019) ressaltam a importância da umidade do solo na interface solo-planta-atmosfera, destacando seu papel essencial para estudos hidrológicos e de mudanças climáticas. Os autores destacam que a umidade do solo regula a distribuição dos fluxos de massa e energia entre a terra e a atmosfera, influenciando processos como evaporação da superfície, escoamento, albedo e emissividade. Robock (2003) complementa ao discutir como a umidade superficial do solo afeta a distribuição da energia disponível entre calor sensível e calor latente trocados com a atmosfera, conectando os balanços hídrico e energético através das variáveis de umidade e temperatura do solo.

Na agricultura, a umidade do solo está diretamente associada aos parâmetros de Capacidade de Campo (CC) e Ponto de Murcha Permanente (PMP), sendo crucial para o desenvolvimento das culturas, em particular no semiárido brasileiro, onde a irregularidade das precipitações e a limitação da disponibilidade hídrica representa desafios constantes. Carvalho *et al.* (2023) enfatiza que a água é fundamental para a produtividade agrícola, pois todas as culturas necessitam de grandes quantidades de água durante seu ciclo vegetativo e produtivo. Braga *et al.* (2018) ressaltam que o monitoramento contínuo da umidade do solo é essencial para o manejo eficiente da irrigação, permitindo determinar o momento adequado para irrigar e a quantidade de água necessária. Diversas metodologias e dispositivos têm sido desenvolvidos ao longo do tempo para medir o teor de água no solo, variando em precisão, custo e facilidade de uso.

A estimativa da umidade do solo é essencial para a gestão eficiente dos recursos hídricos e para o manejo agrícola adequado. Entre os métodos diretos, o método gravimétrico é o mais preciso, envolvendo a coleta e secagem de amostras de solo para determinar o teor de umidade por diferença de peso (Braga *et al.*, 2018; Teixeira *et al.*, 2017). No entanto, devido ao seu caráter laboratorial e à necessidade de coletas físicas, ele é limitado para aplicações em larga escala, embora seja um método preciso e utilizado como padrão para a calibração de outros métodos (Bernardo *et al.*, 2006). Tensiômetros são utilizados para medir a tensão da água no solo e são eficazes para monitoramento contínuo, embora sua precisão possa variar com o tipo de solo e profundidade (Azevedo e Silva, 1999).

Métodos indiretos, como sensores de umidade, oferecem medições em tempo real e são amplamente aplicados pela praticidade e precisão. De acordo com Costa *et al.* (2013), os métodos indiretos são frequentemente empregados em pesquisas e sistemas de agricultura de precisão para monitorar o teor de água no solo. Isso se deve à sua praticidade, rapidez e capacidade de realizar múltiplas medições em uma área específica em intervalos curtos. Pandey, Putrevu e Misra (2021) reforçam que o sensoriamento remoto, através de satélites que monitoram a umidade do solo, oferece dados globais e contínuos. Além disso, plataformas que disponibilizam dados operacionais diários com resoluções aplicáveis em avaliações de produtividade agrícola, monitoramento de estresse hídrico e gestão de eventos extremos, como enchentes e secas, são fundamentais.

Além disso, modelos hidrológicos como o *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) permitem a simulação da umidade do solo com base em dados climáticos e de solo, ajudando a preencher lacunas temporais e espaciais e a analisar tendências ao longo do tempo. O SWAT tem sido utilizado como uma alternativa para construir bancos de dados regionais e globais sobre umidade do solo. Uniyal *et al.* (2017), destacam o SWAT como uma ferramenta essencial para a avaliação da umidade do solo, concluindo, a partir da análise de diversas pesquisas que utilizaram a ferramenta em conjunto com dados de sensoriamento remoto, que a estimativa da umidade do solo é geralmente feita em escala de ponto ou campo. No entanto, a simulação hidrológica e as técnicas de sensoriamento remoto permitem quantificar a umidade do solo em escalas maiores, como de bacia hidrográfica ou até global. Essas abordagens também possibilitam a estimativa da umidade do solo em anos anteriores. Assim, o uso de modelos simulados e dados de sensoriamento remoto pode preencher lacunas temporais e espaciais, aprimorando estudos de longo prazo e o gerenciamento da água na agricultura, conforme destacado pelos autores.

O SUPeR, entre outras aplicações, possibilita avaliar a umidade do solo. Embora diferentes estudos venham sendo desenvolvidos utilizando a plataforma, poucos trabalhos foram realizados avaliando as séries de umidade do solo disponíveis. Um exemplo notável é a pesquisa de Galvinctio, Miranda e Da Luz (2024), que analisou a umidade do solo em sub-bacias hidrográficas sujeitas a diferentes características ambientais, utilizando a umidade do solo como indicador de mudanças climáticas. Os autores discutiram os impactos das variações climáticas e como essas mudanças afetam os regimes de seca e inundações em duas importantes bacias hidrográficas de Pernambuco. Moura *et al.* (2024), também fizeram uma importante contribuição ao calibrar o SUPeR com base em dados diários observados de umidade do solo coletados entre 2014 e 2020, utilizando sensores instalados em uma torre micrometeorológica. O estudo foi realizado em uma área de Caatinga na Bacia do Pontal, Pernambuco, avaliou a disponibilidade de água no solo modelada pelo SUPeR e sua correlação com a umidade do solo em diferentes profundidades. Os resultados mostraram uma correlação significativa entre os dados modelados e observados, confirmando a eficácia do SUPeR em prever a disponibilidade de água no solo na Caatinga.

2.4 Sensoriamento remoto aplicado à estimativa de Evapotranspiração

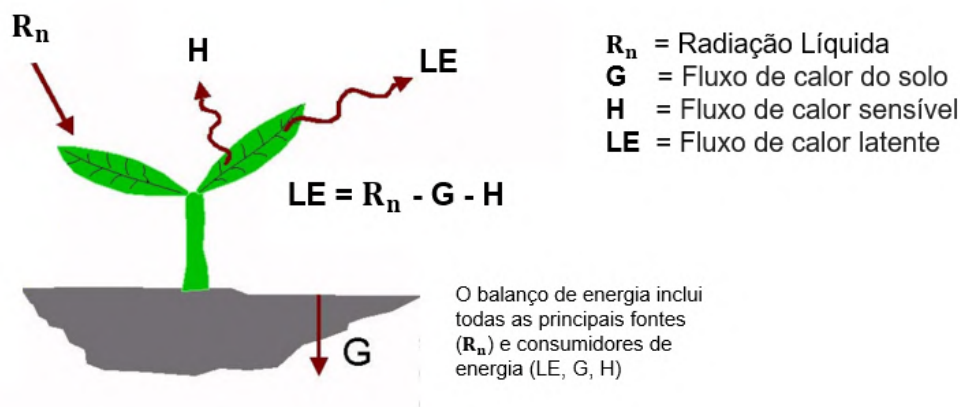
A evapotranspiração é um processo crucial na dinâmica dos recursos hídricos e no balanço hídrico. Ela pode ser definida como a soma da água perdida por uma superfície coberta com vegetação, incluindo a evaporação direta do solo e a transpiração das plantas (Braun *et al.*, 2001; Santos, 2020). A evapotranspiração de cultura (ET_c) é um conceito fundamental para o manejo da irrigação. A ET_c representa a quantidade de água que deve ser reposta no solo para manter o crescimento e a produção da cultura em condições ideais, sem limitações impostas por pragas, doenças, deficiências nutricionais, ou hídricas. Este parâmetro é diretamente influenciado pela área foliar da planta e varia ao longo do ciclo da cultura, com o valor do coeficiente de cultura (K_c) aumentando até atingir um pico durante o máximo crescimento da área foliar, e diminuindo durante a senescência das folhas (Coelho Filho *et al.*, 2011).

Em razão da complexidade e da importância da evapotranspiração para a gestão dos recursos hídricos, diversos métodos empíricos e semiempíricos foram desenvolvidos para estimá-la com base em dados meteorológicos e de satélite. Estes métodos buscam simplificar a estimativa e proporcionar uma análise mais eficiente das necessidades hídricas das culturas (Braun *et al.*, 2001). A estimativa da evapotranspiração em escalas global, regional e local é crucial para o balanço hídrico, o planejamento agrícola, o manejo dos recursos hídricos e os estudos meteorológicos e climatológicos, pois integra aspectos de energia, clima e hidrologia (Braun *et al.*, 2001; Boratto e Gomide, 2013).

O balanço de energia na superfície terrestre refere-se ao equilíbrio entre a energia que atinge a superfície e a energia que é refletida, emitida ou convertida em outras formas. Esse conceito é fundamental para compreender os processos que regulam o clima, a evaporação da água, o crescimento das plantas e diversos outros fenômenos ambientais. Entre os modelos disponíveis para o cálculo da evapotranspiração, o *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (SEBAL) é um dos mais amplamente difundidos e utilizados. Desenvolvido por Bastiaanssen (1998), o SEBAL determina a evapotranspiração (ET) utilizando imagens de satélite e dados meteorológicos, baseando-se no balanço de energia da superfície. O modelo calcula o fluxo de calor latente (LE) instantâneo para o momento em que a imagem de satélite foi capturada, e a evapotranspiração diária (ET_d) é estimada a partir do fluxo de calor

latente, derivado do balanço de energia da superfície. LE é calculado para cada pixel da imagem, sendo considerado como o "resíduo" da equação de balanço de energia da superfície, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1: representação dos componentes da evapotranspiração (ET)



Fonte: Adaptado e traduzido pela autora, baseado em Alenn *et al.* (2002) e Aryalekshmi *et al.* (2021).

Os métodos empíricos para a estimativa de evapotranspiração (ET) representam um avanço significativo em relação às técnicas tradicionais, como a razão de Bowen, lisímetro, cintilômetro, medição de pan, covariância de Eddy, dentre outros. Esses métodos permitem determinar a ET em diferentes escalas, ampliando as possibilidades de estudos em diversos contextos. Conforme Allen *et al.* (1998), diversos métodos empíricos foram desenvolvidos por cientistas e pesquisadores, utilizando uma variedade de elementos climáticos para a estimativa da ET. Entre os métodos para estimativa de ET, destacam-se aqueles baseados em imagens de satélite, que oferecem uma abrangência muito maior na escala de análise em comparação com os modelos empíricos tradicionais baseados em dados climáticos, como o Método de Thornthwaite (Thornthwaite, 1948), o Método de Hargreaves (Hargreaves e Allen, 2003), a equação de Penman, a equação de Penman-Monteith, a equação de Priestley-Taylor (PT), a equação de Penman-Monteith FAO56, e a equação de ASCE EWRI (Subedi *et al.*, 2017). Embora esses métodos sejam importantes, apresentam uma forte dependência de dados meteorológicos e são mais restritos em sua aplicação a pequenas regiões, como discutido por Aryalekshmi *et al.* (2021).

Cada componente do balanço de energia desempenha papel essencial na avaliação climática, na gestão dos recursos hídricos, bem como na avaliação ambiental. Além dos componentes do saldo de radiação, os parâmetros biofísicos

obtidos a partir do método SEBAL são cruciais para avaliar as condições de modificação dos alvos vegetativos, permitindo uma análise mais precisa das respostas sobre os recursos hídricos, como analisa Martins e Galvani (2020) em relação ao uso e cobertura da terra e a resposta dos parâmetros biofísicos para o Cerrado Brasileiro.

A resposta espectral dos índices de vegetação está diretamente relacionada às características das faixas do vermelho (Red) e do infravermelho próximo (NIR). A estrutura celular dos alvos vegetativos reflete com maior eficiência a banda do NIR, especialmente na faixa de 0,7 a 1,1 μm . Os sensores acoplados aos satélites em órbita captam a reflectância nessas faixas de comprimento de onda, permitindo classificar os alvos na superfície com base em sua resposta espectral, e os valores obtidos possibilitam sua discriminação (Jensen, 2009; Rouse *et al.*, 1974). Barros *et al.* (2023) destacam a importância desses parâmetros para a compreensão das modificações na cobertura vegetal em áreas beneficiadas pelo Projeto de Integração do Rio São Francisco (PISF).

Além disso, as características temporais da vegetação, associadas ao uso de índices de vegetação, são descritas por Jensen (2009) como importantes parâmetros biofísicos. A reflectância dos alvos vegetativos permite compreender os impactos e mudanças na cobertura vegetal, bem como o vigor das áreas vegetadas. Outros parâmetros biofísicos, como o albedo da superfície e a temperatura da superfície, também são de extrema relevância, pois possuem uma maior correlação com o saldo de radiação, os fluxos de calor e a evapotranspiração (Lopes *et al.*, 2010).

Nesse sentido, o sensoriamento remoto demonstra-se uma ferramenta de grande relevância para estudos ambientais, especialmente no monitoramento de parâmetros como a evapotranspiração. Freire-Silva *et al.* (2022), afirma que a utilização de informações provenientes do sensoriamento remoto e de modelagens ambientais oferece uma alternativa eficaz para o estudo de grandes áreas, permitindo a observação de parâmetros sensíveis com um custo significativamente menor em comparação a visitas *in loco* e análises ambientais físicas. A sustentabilidade da agricultura, por sua vez, está diretamente ligada ao uso eficiente da água, o que torna essencial o monitoramento das demandas hídricas das culturas e o controle do uso da água destinada à irrigação, garantindo assim a disponibilidade de água para diversos usos (Torres e Campos, 2022). Esse monitoramento torna-se ainda mais crítico diante dos impactos negativos das mudanças climáticas sobre a disponibilidade hídrica, especialmente em terras agrícolas de sequeiro, como ressalta Liu *et al.* (2022)

em sua avaliação sobre a escassez global de água para a agricultura. Assim, o sensoriamento remoto emerge como uma tecnologia crucial para garantir a sustentabilidade hídrica na agricultura, permitindo a estimativa precisa da evapotranspiração e contribuindo para a gestão eficiente dos recursos hídricos.

2.5 Regulamentação e Políticas Públicas na gestão agrícola e da água

O Código de Águas, promulgado pelo Decreto Federal nº 24.643 de 1934, é uma das legislações mais antigas e importantes do Brasil para a gestão dos recursos hídricos. Ele foi um marco histórico, especialmente para o desenvolvimento da agricultura no país, por diversas razões.

Na década de 1930, o Brasil vivia um período de industrialização e modernização, necessitando de uma regulamentação eficiente para os recursos naturais, incluindo a água, que era crucial para o desenvolvimento econômico e social (Peccatiello, 2011). A promulgação do Código de Águas foi uma resposta a essa necessidade, criando um conjunto de normas abrangentes para o uso e a gestão dos recursos hídricos. Dentre os principais aspectos do Código de Águas está a distinção entre águas públicas, de domínio federal e estadual, e privadas, estabelecendo que os recursos hídricos superficiais e subterrâneos são bens públicos. A instituição do regime de outorgas e definição das prioridades de uso são aspectos essenciais para garantir o uso racional e sustentável dos recursos hídricos, sobretudo em situações de escassez (ANA, 2011).

Embora o Código de Águas de 1934 tenha sido um marco, ele foi complementado e atualizado por outras legislações ao longo dos anos. A Lei nº 9.433 de 1997, conhecida como Lei das Águas, criou a Política Nacional de Recursos Hídricos e o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, introduzindo novos princípios e diretrizes para a gestão integrada e participativa dos recursos hídricos no Brasil (Sobral, 2011). Como destacado pela ANA (2021), a gestão hídrica em um país de dimensões continentais e grande geodiversidade, como o Brasil, é um desafio complexo que exige uma abordagem adaptada às condições específicas de cada região. Nesse contexto, os gestores enfrentam o desafio de administrar esse recurso natural de forma eficiente, considerando sua capacidade limitada de renovação em relação às diversas demandas de usos múltiplos que ele deve atender (Soares e Campos, 2013).

Campos e Fracalanza (2010) destacam que a Lei das Águas (Lei nº 9.433/1997) representa um marco fundamental na gestão hídrica no Brasil, integrando componentes essenciais como a política de águas, o plano de uso e controle dos recursos hídricos e o monitoramento de seus usos. A complexidade dessa gestão se reflete na necessidade de arbitragem de conflitos relacionados à água, especialmente em situações de escassez, onde a apropriação deste recurso por diferentes grupos pode gerar tensões. A Lei das Águas estabeleceu uma base normativa crucial para a gestão dos recursos hídricos no Brasil, influenciando a formulação de outras políticas setoriais, como a Política Nacional de Irrigação (Lei nº 12.787/2013). Embora a Lei de Irrigação ainda careça de regulamentação em diversos aspectos, a sua proposta de compatibilização dos planos de irrigação com os planos de recursos hídricos reflete um esforço claro de integração das políticas, visando garantir que o uso da água para irrigação esteja em conformidade com os objetivos mais amplos de gestão sustentável dos recursos hídricos estabelecidos pela Lei das Águas (ANA, 2021). Este alinhamento é crucial, especialmente em regiões vulneráveis como o semiárido, onde a gestão eficiente dos recursos hídricos é fundamental para promover a segurança hídrica e mitigar os impactos da seca.

No contexto de integração das políticas públicas, Castro e Cerezini (2023), citam que, no semiárido brasileiro, uma região historicamente marcada pela escassez de água, as políticas públicas evoluíram de abordagens paliativas para estratégias mais integradas de convivência com a seca, reconhecendo a importância de uma gestão hídrica eficaz para mitigar os efeitos da aridez prolongada.

O Plano Nacional de Segurança Hídrica (PNSH) também pode ser citado no contexto da gestão agrícola da água. Castro (2021) examina o Plano Nacional de Segurança Hídrica (PNSH) e sua importância para gerenciar a crescente demanda por água no Brasil. O autor destaca que a expansão da irrigação em áreas com baixa disponibilidade hídrica pode comprometer a segurança hídrica e gerar conflitos de uso. Castro, 2022, defende uma implementação cuidadosa do PNSH, garantindo que projetos de desenvolvimento estejam alinhados com a manutenção da segurança hídrica e a gestão eficiente dos recursos.

No que se refere à regulamentação e as políticas públicas voltadas para a agricultura, tais ações desempenham um papel crucial no desenvolvimento sustentável do setor agrícola no Brasil, especialmente no que diz respeito à gestão eficiente dos recursos hídricos. Marcos regulatórios e programas específicos

merecem destaque por sua importância nesse contexto: a Lei de Irrigação (Lei nº 12.787/2013), Programas e Incentivos para a Agricultura Sustentável e Diretrizes para a Gestão da Água na Agricultura.

Programas como o Programa de Agricultura de Baixo Carbono (ABC) desempenham um papel vital na promoção de práticas agrícolas sustentáveis. O programa incentiva a adoção de técnicas que minimizem o impacto ambiental da agricultura, como o uso eficiente da água e a conservação dos recursos naturais. Esses incentivos são fundamentais para alinhar a produção agrícola com os princípios da sustentabilidade, garantindo que o crescimento do setor não ocorra às custas da degradação ambiental. Por meio de tais iniciativas, o Brasil busca transformar a agricultura em uma atividade que contribui para a mitigação das mudanças climáticas e para a preservação dos recursos hídricos, promovendo um equilíbrio entre produtividade e responsabilidade ambiental (Telles *et al.*, 2021).

As diretrizes para a gestão da água na agricultura estabelecem orientações claras para o uso eficiente dos recursos hídricos no setor agrícola. Elas incluem o planejamento das infraestruturas de irrigação, que é fundamental para assegurar que a água seja utilizada de forma racional e sustentável. Além disso, essas diretrizes promovem a integração das políticas de gestão de recursos hídricos com as práticas agrícolas, assegurando que a água disponível seja alocada de maneira que atenda às necessidades agrícolas, sem comprometer outros usos essenciais, como o consumo humano e a preservação dos ecossistemas. Essas orientações são cruciais para garantir que a agricultura brasileira continue a se desenvolver de maneira sustentável, preservando os recursos hídricos para as futuras gerações.

Nesse contexto, a agricultura familiar no Brasil destaca-se como um exemplo de como iniciativas públicas podem fortalecer práticas sustentáveis e fomentar o desenvolvimento local. Souza (2019) corrobora essa visão ao enfatizar que, nas últimas décadas, a agricultura familiar tem desempenhado um papel essencial no desenvolvimento, impulsionada por um contexto institucional público que viabiliza sua caracterização e a formulação de políticas específicas. Entre essas iniciativas, destaca-se o Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar (PRONAF), criado em 1996, que oferece crédito, assistência técnica e incentivos para a geração de renda. Além disso, a Lei 11.947/2009 reforça o apoio ao setor, ao estabelecer que 30% dos recursos do Programa Nacional de Alimentação Escolar (PNAE), repassados pelo Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação (FNDE),

sejam destinados à compra de alimentos provenientes de agricultores familiares e empreendedores individuais.

Esses marcos regulatórios e programas específicos são fundamentais para o avanço da agricultura no Brasil, sobretudo considerando que as mudanças climáticas têm afetado significativamente a produção agrícola e a segurança alimentar, especialmente em regiões onde predominam pequenos produtores, como é o caso do semiárido brasileiro. Aquino, Alves e Vidal (2020) destacam que a agricultura familiar apresenta uma representatividade significativa no contexto regional do Nordeste brasileiro, permanecendo como a principal modalidade de produção e trabalho rural, representando 47,2% do total nacional.

Os desafios enfrentados na implementação e na fiscalização das políticas de gestão de recursos hídricos e agricultura, bem como a necessidade de adaptação às mudanças climáticas a Agenda 2030, adotada na Cúpula das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento Sustentável em 2015, é um compromisso global dos 193 Estados-membros da ONU, incluindo o Brasil. Ela se tornou a principal referência para a formulação e implementação de políticas públicas em todo o mundo. A Agenda 2030 estabelece metas e diretrizes que visam assegurar dignidade e qualidade de vida para todos, ao mesmo tempo em que preserva o meio ambiente para as futuras gerações. Seu papel interdisciplinar é fundamental, pois permeia todas as políticas públicas, integrando aspectos sociais, econômicos e ambientais (PNUMA ONU, 2018; ONU Brasil, 2024).

Os ODSs 6, 13 e 2 são fundamentais para a agricultura ao abordarem a gestão da água, as mudanças climáticas e a segurança alimentar, promovendo uma abordagem integrada, sistêmica e preditiva para enfrentar os desafios hídricos e climáticos na agricultura (ONU Brasil, 2024). O ODS 6 foca na gestão sustentável da água, essencial para a irrigação agrícola eficiente, enquanto o ODS 13 busca fortalecer a resiliência das práticas agrícolas às mudanças climáticas, que afetam diretamente a disponibilidade hídrica. O ODS 2 promove a agricultura sustentável, garantindo a segurança alimentar por meio de práticas que utilizam a água de forma eficiente e resiliente.

Entre as metas relacionadas ao ODS 6, destaca-se a meta 6.4, que trata da eficiência no uso da água pelos diferentes setores usuários e da retirada sustentável dos recursos hídricos, de extrema relevância para a gestão dos recursos hídricos. Além disso, os indicadores da meta 6.4 destacam a importância de aumentar a

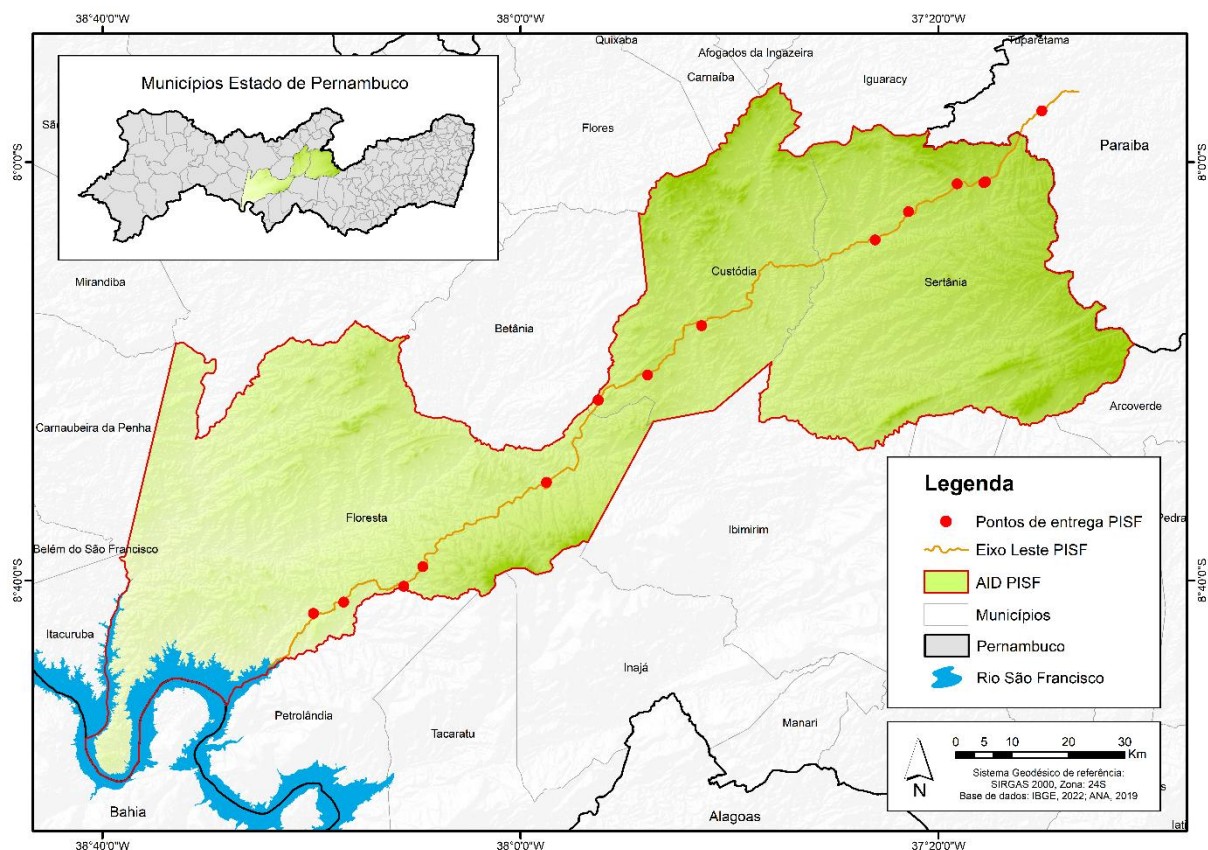
eficiência no uso da água e reduzir o estresse hídrico, considerando a relação entre a retirada de água doce, a disponibilidade hídrica e os múltiplos usos da água, de modo a aliar o crescimento e a manutenção da atividade agrícola à sustentabilidade global, assegurando tanto o consumo humano prioritário quanto o uso eficiente da água em atividades produtivas.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área de estudo

A área de estudo compreende o Eixo Leste do Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional (PISF), especificamente a Área de Influência Direta (AID) do projeto no estado de Pernambuco (Figura 2). A AID é uma área de abordagem definida pelo Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e o Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) para o diagnóstico ambiental do PISF. Foram definidas três áreas de abordagem de acordo com o EIA/RIMA do PISF: a Área de Influência Indireta (AII), que se relaciona com processos físicos, bióticos e sociais em abrangência regional com efeitos secundários, a AID, onde ocorrem os efeitos primários das inter-relações entre espaço físico, biota, sociedade e o empreendimento; e a Área Diretamente Afetada (ADA), que corresponde territorialmente ao espaço de intervenção física das obras do PISF (IBAMA, 2005).

Figura 2: Localização da Área de Influência Direta do Projeto de transposição do rio São Francisco no Estado de Pernambuco



Fonte: Autora (2025).

De acordo com a definição apresentada pelo EIA/RIMA do projeto de transposição, a AID abrange os municípios onde estão situadas as estruturas de adução e os rios e açudes que fazem parte do sistema do Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional. Essa área cobre aproximadamente 66.500 km², com uma extensão de aproximada de 720 km ao longo de canais artificiais, contendo estações de bombeamento, aquedutos, túneis e pequenos reservatórios planejados, além de 750 km ao longo dos leitos naturais (IBAMA, 2005). No Eixo Leste do PISF, a área que compreende o estado de Pernambuco abrange os municípios de Floresta, Custódia e Sertânia localizados respectivamente entre as coordenadas 8°36'00" S de latitude e 38°34'00" O de longitude, 8°05'15" S de latitude e 37°38'35" O de longitude e 8°04'25" S de latitude e 37°15'00" O de longitude (Figura 2).

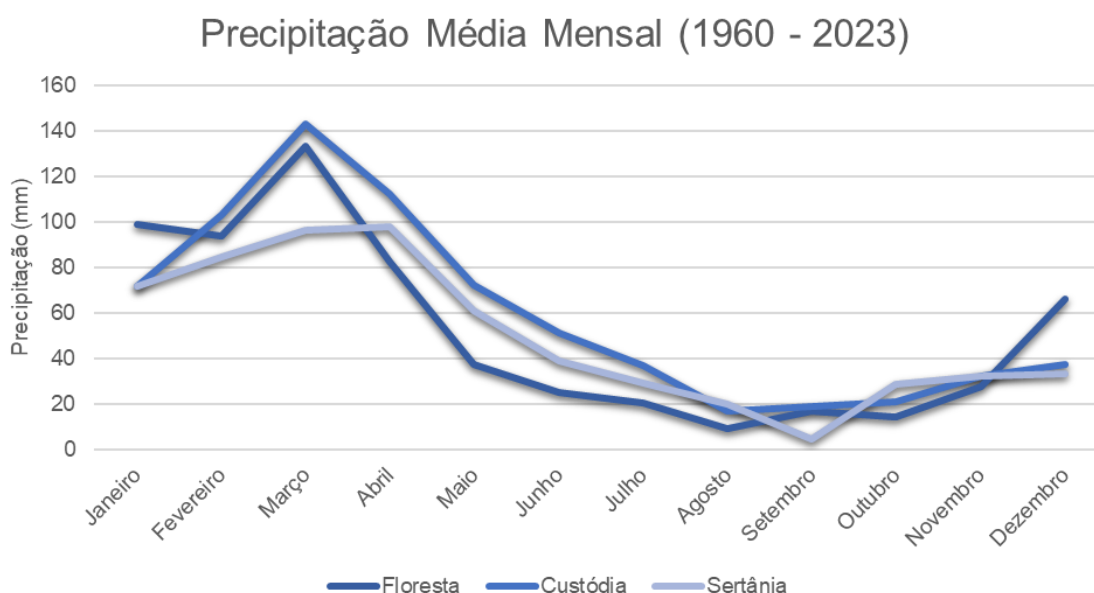
De acordo com a avaliação do EIA/RIMA do PISF realizada pelo IBAMA (2005) a economia da AID é frágil, centrada na agropecuária tradicional, que enfrenta limitações devido à organização interna e à escassez de recursos hídricos. A produção agrícola é predominantemente de subsistência, com culturas como feijão e milho ocupando a maior parte das terras cultivadas. Diante da incerteza climática e da baixa geração de excedentes econômicos, a agropecuária na região tem se mantido com baixos investimentos em equipamentos e tecnologia (IBAMA, 2005).

3.1.1 Clima e Relevo

A AID está interinamente inserida em uma região semiárida, apresentando uma variabilidade significativa tanto temporal quanto espacial das precipitações pluviométricas. A região experimenta variações interanuais marcadas por períodos de seca e eventos extremos de precipitação, com médias anuais de precipitação inferiores a 800 mm e temperaturas médias variando entre 23°C e 27°C (Moura *et al.*, 2012). A insuficiência das precipitações em relação às elevadas taxas de evapotranspiração é uma característica predominante, resultando em déficits hídricos substanciais (Marengo *et al.*, 2011). De acordo com a classificação climática de Koeppen (1948), o clima da região semiárida é classificado como BSw^h, descrito como Semiárido Quente, caracterizado pela escassez e irregularidade das chuvas, alta insolação, baixa nebulosidade e elevados índices de evapotranspiração (EMBRAPA, 2024).

O clima semiárido, embora pouco diversificado, apresenta pequenas variações que constituem microclimas específicos, que ocorrem em decorrência da elevação e da influência de grandes corpos hídricos como o São Francisco, que altera o volume de precipitação na mesorregião do Sertão do São Francisco em detrimento da mesorregião do Sertão pernambucano (Barbosa *et al.*, 2023). A Figura 3 apresenta as médias de precipitação mensal para o período entre 1960 e 2023, com base em três postos pluviométricos disponíveis nos municípios que compõem a AID. Percebe-se que os regimes de precipitação apresentam diferenças, porém há similaridade em relação às variações pluviométricas anuais, com concentração das chuvas entre os meses de fevereiro e abril.

Figura 3: Precipitação média mensal no período entre 1960 e 2023 nos municípios de Floresta, Custódia e Sertânia, em Pernambuco



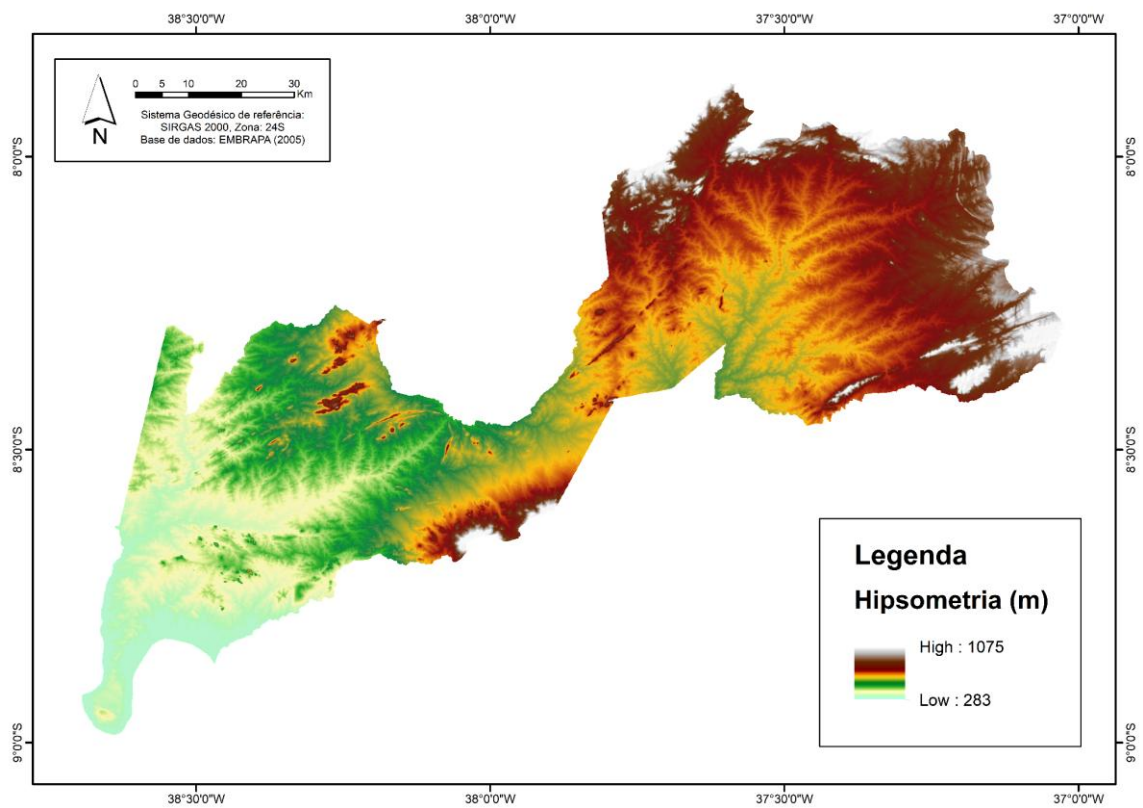
Fonte: Autora, a partir de dados da Agência Pernambucana de Águas e Clima.

Moura *et al.* (2012) salientam que o clima do semiárido brasileiro é fortemente influenciado por sistemas que regulam a variabilidade interanual das precipitações, como a Temperatura da Superfície do Mar (TSM) nos oceanos tropicais, que afeta a posição e a intensidade da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) sobre o Oceano Atlântico; a ZCIT é o principal sistema de produção das chuvas do Sertão (França, 2021). A variabilidade climática no semiárido está fortemente associada a eventos como *El Niño* e *La Niña*, que influenciam, significativamente, o regime de chuvas na região. Secas intensas, como as registradas em 1982-1983, 1997-1998 e 2015-2016, ocorreram durante os anos de *El Niño* forte. Embora essas secas históricas estejam

principalmente ligadas ao *El Niño*, episódios recentes durante períodos de *La Niña* também resultaram em secas, destacando a complexidade climática da região (Marengo *et al.*, 2019).

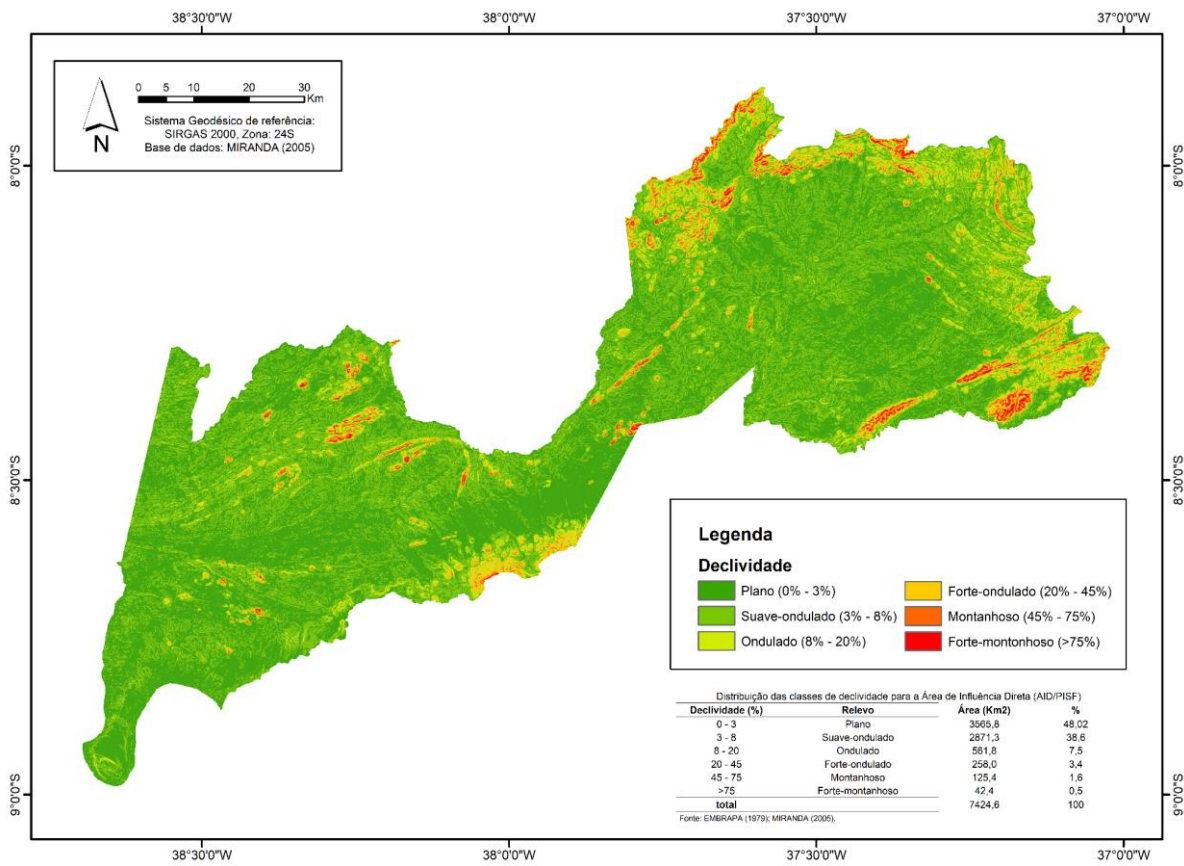
O relevo desempenha um papel importante na diferenciação climática e nas condições hidrológicas, como os fluxos de escoamento. A AID apresenta relevo plano e suave-ondulado (Figura 5), que representam aproximadamente 90% da área, cortada por vales estreitos com vertentes dissecadas. A altimetria varia de 283 m a 1075 m (Figura 4).

Figura 4: hipsometria da Área de Influência Direta do Projeto de Transposição do Rio São Francisco



Fonte: Autora (2025), elaborado a partir de dados da coleção Brasil em Relevo, EMBRAPA.

Figura 5: Declividade da Área de Influência Direta do Projeto de Transposição do Rio São Francisco



Fonte: Autora (2025), elaborado a partir de dados da coleção Brasil em Relevo, EMBRAPA.

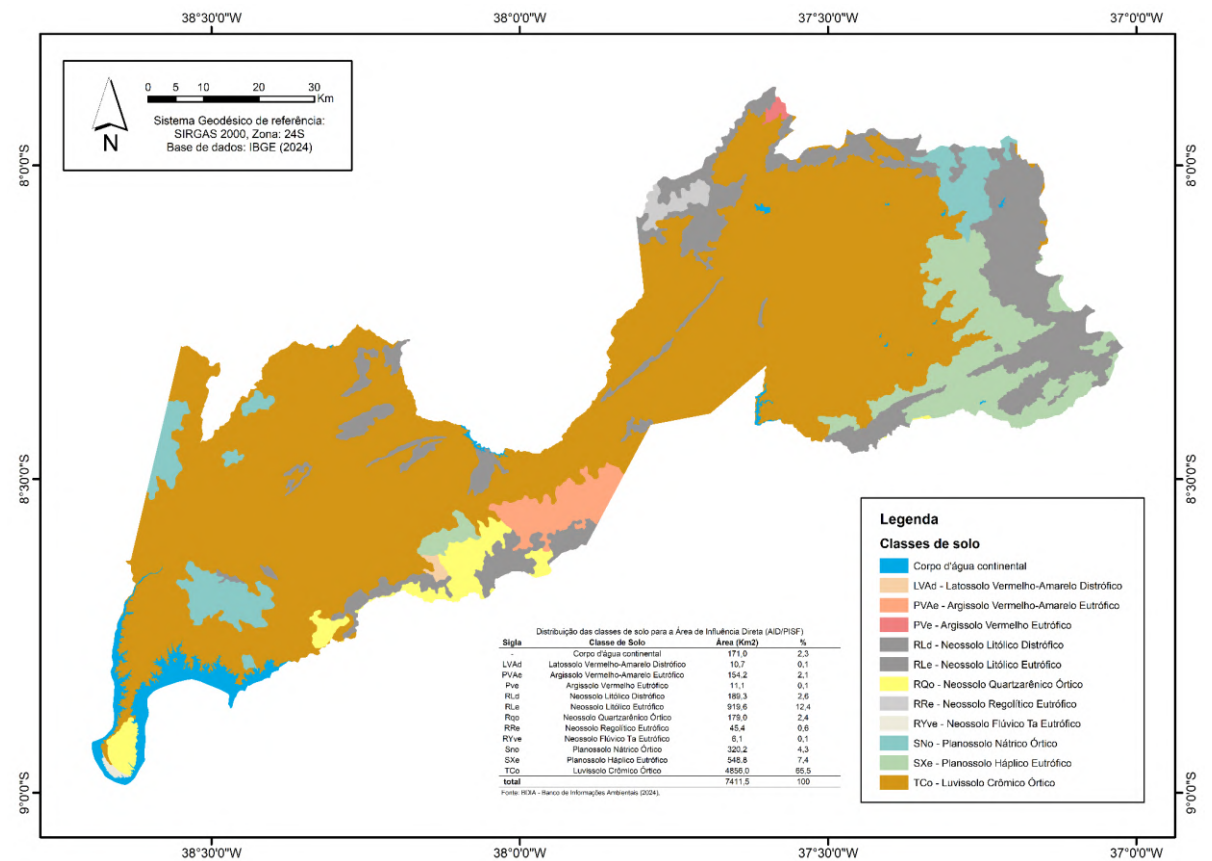
Ferreira, Dantas e Shinzato (2014) citam que a Depressão Sertaneja é predominantemente caracterizada por extensas superfícies aplainadas, situadas em altitudes modestas, intercaladas com serras e planaltos residuais que se elevam entre 300 e 500 m acima dos pediplanos. Esses relevos são sustentados pelo embasamento ígneo-metamórfico da Faixa de Dobramentos Nordeste. Os domínios geomorfológicos que abrangem a AID são o Planalto Sedimentar da Bacia do Jatobá na porção sudoeste, e as áreas de maior altitude a nordeste, compreendendo as elevações provenientes do Planalto da Borborema.

3.1.2 Solos

Araújo Filho *et al.* (2022) discutem que no semiárido, há predomínio da vegetação caducifólia do bioma Caatinga. No entanto, existem áreas com vegetação florestal mais úmida, Cerrado ou formações de transição. A diversidade geológica resulta em uma ampla variedade de solos (Figura 6), que variam de rasos e arenosos a profundos e argilosos. A escassez de umidade limita a intemperização das rochas,

frequentemente deixando solos com frações grossas. Essas condições criam uma grande variedade de geoambientes na região.

Figura 6: classes de solo daÁrea de Influência Direta do Projeto de Transposição do Rio São Francisco



Fonte: A autora (2025). Elaborado a partir de dados pedológicos do Banco de Informações Ambientais (BDIA/IBGE).

Os principais solos presentes na AID, apresentados na Figura 6, compreendem os Luvissolos Crômicos (TC), que compõem mais da metade da área de estudo, seguidos pelos Neossolos Litólicos (RL) que ocupam, aproximadamente, 13% da região. Coelho *et al.* (2002) afirmam que grande parte do Semiárido brasileiro é composto por Luvissolos, que podem ser definidos como solos minerais eutróficos, de pouca profundidade, com um horizonte B textural de alta atividade argilosa e elevados teores de cátions básicos. Eles geralmente apresentam pedregosidade na superfície e podem ter características vérticas, solódicas ou salinas (Santos, 2018; Castro, 2024).

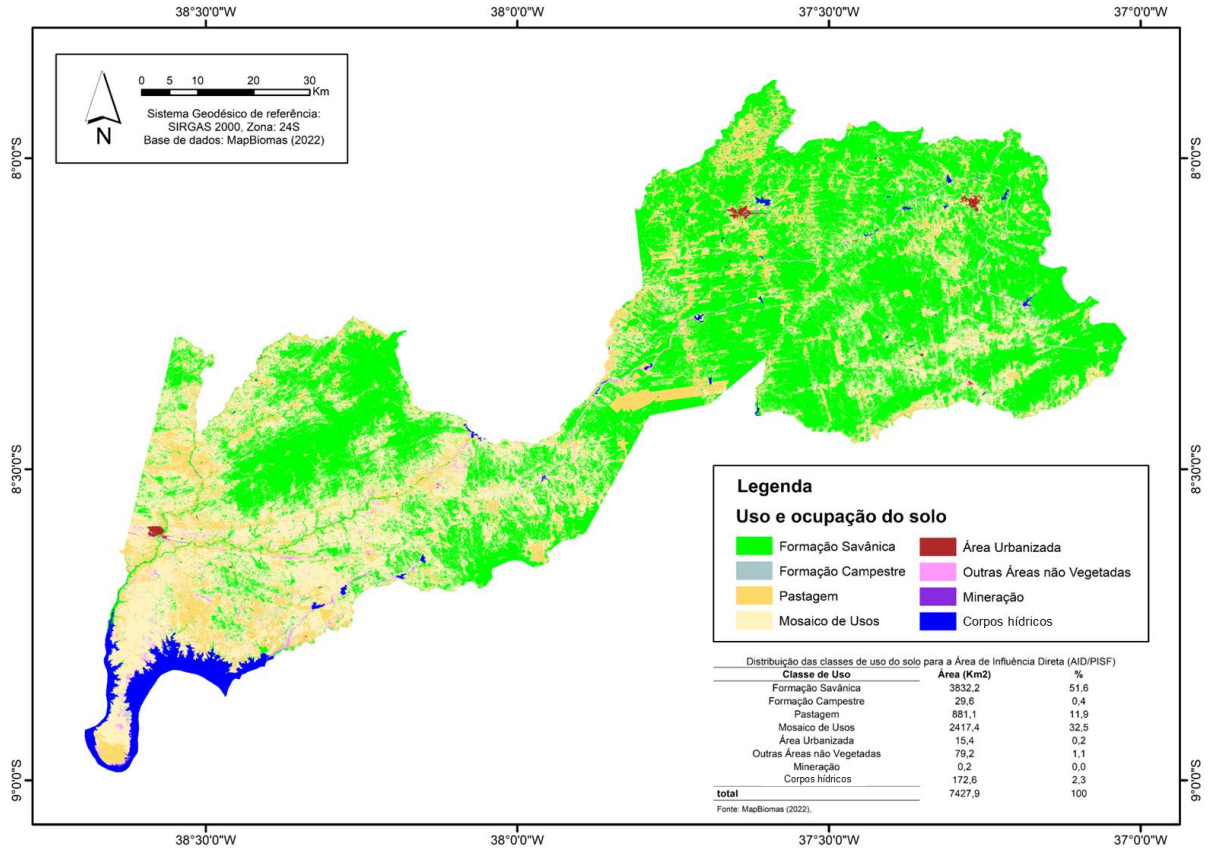
A aptidão agrícola está diretamente relacionada à distribuição dos solos, nos quais são cultivadas culturas como milho, feijão e mandioca, que possuem maior expressividade nas áreas de influência do PISF (HIDROBR, 2022). Embora os

Luvissolos sejam relativamente férteis, com altos teores de cátions básicos e boa capacidade de retenção de água, sua baixa profundidade e pedregosidade superficial limitam o desenvolvimento de algumas culturas. Por outro lado, os Neossolos Litólicos, caracterizados por baixa profundidade e alta pedregosidade, apresentam menor aptidão agrícola, exigindo práticas de manejo específicas e são considerados inaptos para manejo de irrigação, devido às suas características impeditivas. Dessa forma, a aptidão agrícola da região apresenta potencialidades e limitações, sendo os solos de menor expressão na área como Latossolos, Argissolos e Neossolos Flúvicos os que apresentam maior potencial para o desenvolvimento agrícola e manejo irrigado. Leite (2022) destaca que o solo, a vegetação e o clima no semiárido brasileiro coexistem em um equilíbrio dinâmico, suscetível a alterações pelo uso e manejo do solo. Nesse contexto, o manejo sustentável deve considerar as interações entre condições climáticas, geomorfológicas, pedológicas e de uso e cobertura vegetal, fatores que influenciam diretamente a produção agrícola e a sustentabilidade dos sistemas de manejo.

3.1.3 Uso e ocupação do solo

As principais formas de uso e ocupação na AID estão relacionadas com a formação do bioma Caatinga, se apresentando como forma de uso predominante no mapa de uso do solo para o ano de 2022. A caatinga ocupa mais de 50% da área de estudo e corresponde a classe de formação savânica de acordo com a código de legenda para os valores de pixels da Coleção 7.1 do MapBiomas. (Figura 7)

Figura 7: Uso e ocupação do solo para o ano de 2022 da Área de Influência Direta do Projeto de Transposição do Rio São Francisco



Fonte: Autora (2025). Elaborado a partir da coleção BETA do MapBiomas 10 metros.

As demais classes predominantes referem a Mosaico de uso e pastagem, que ocupam aproximadamente, 33% e 13% da área, respectivamente. De acordo com a definição da literatura, a classe “Mosaico de Usos” é definida como: “áreas de uso agropecuário onde não foi possível distinguir entre pastagem e agricultura” (Souza et al., 2020; Leandro, Bayma e Bolfe, 2023). Com representatividade menor que 3% são encontradas as demais classes de uso e cobertura do solo (Figura 7).

Com a projeção de expansão das áreas agrícolas produtivas, identificada no EIA do PISF (MI, 2004), em decorrência do aumento da oferta hídrica, o uso do solo na AID tende a ser alterado nos próximos anos, o que poderá impactar a cobertura vegetal e os recursos hídricos da região.

Quanto ao uso agrícola, a diferenciação entre as classes de uso do MapBiomas para a área de estudo não contempla uma classe específica destinada à agricultura. No entanto, a agricultura desempenha um papel fundamental no cenário socioeconômico do Brasil e em toda região Nordeste, sendo praticada em diferentes escalas e modelos de produção. De acordo com dados do Censo Agropecuário (IBGE,

2019) o Brasil conta com mais de 5 milhões de estabelecimentos agropecuários, considerando tanto produtores familiares quanto não familiares. Desses, aproximadamente 1,8 milhão estão localizados no semiárido, sendo que cerca de 80% desses estabelecimentos são de agricultores familiares (Castro, 2024).

3.1.4 Hidrografia

A AID do Eixo Leste do Projeto de Integração do Rio São Francisco (PISF) está situada entre as bacias hidrográficas dos rios Pajeú e Moxotó, duas das principais bacias do estado de Pernambuco. Dentro dessa área, encontram-se diversos cursos d'água pertencentes a essas bacias, além de importantes reservatórios de abastecimento, como Barra do Juá e Quebra Unha, no município de Floresta; Marrecas, em Custódia; e Barra e Cachoeira I, em Sertânia (APAC, 2023).

A implementação de estratégias de gestão hídrica, como monitoramento por sensoriamento remoto e modelagem hidrológica, é essencial para assegurar a produção agrícola sustentável e resiliente (Olivera-Guerra, Merlin e Er-Raki, 2020; Aryalekshmi *et al.*, 2021). A água captada do Rio São Francisco abastece os estados do Ceará, Paraíba, Pernambuco e Rio Grande do Norte (Castro; Cerezini, 2022). A adução de água para áreas historicamente afetadas pela escassez e irregularidade das chuvas impacta diretamente o setor agrícola na AID e intensifica os conflitos ambientais pelo uso da água, presentes nas regiões beneficiadas pelo projeto (Silva *et al.*, 2015; Maia *et al.*, 2024).

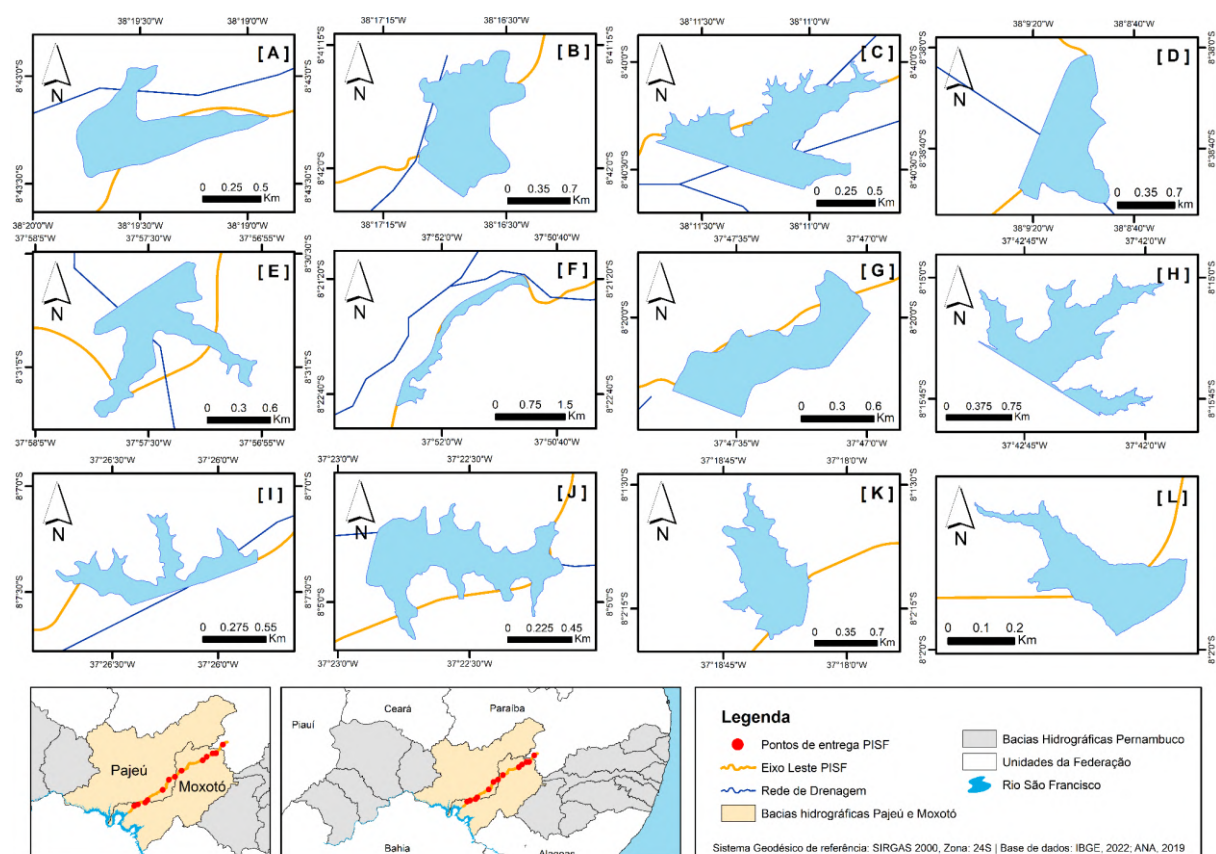
O PISF é a maior obra de infraestrutura hídrica do Brasil, projetada para aumentar a oferta de água no semiárido, visando atender os usos múltiplos, com prioridade para o consumo humano e a dessedentação animal (MI, 2018). A água captada do Rio São Francisco abastece os estados do Ceará, Paraíba, Pernambuco e Rio Grande do Norte (Castro; Cerezini, 2022). A estrutura do Eixo Leste capta água do Rio São Francisco a partir da Lagoa de Itaparica, localizada no município de Floresta, Pernambuco. A água é utilizada para abastecer adutoras e ramais que perenizam rios e açudes existentes na região. As águas do Eixo Leste são direcionadas, principalmente, para a bacia do Rio Paraíba e o Açude Boqueirão, próximo a Campina Grande, além de abastecer o Sertão e a região do Agreste Pernambucano, por meio do Ramal do Agreste (Pires, 2019).

A Agência Nacional de Águas (ANA) outorgou o direito de uso de uma vazão firme de 26,4 m³/s do Rio São Francisco, destinada principalmente ao consumo

humano e à dessedentação animal na região beneficiada. A captação de uma vazão maior, de até 127 m³/s, será permitida em condições específicas, especialmente relacionadas ao nível de água do reservatório de Sobradinho (MI, 2017).

Embora a AID do Eixo Leste inclua apenas três municípios diretamente atravessados pelas obras do PISF em Pernambuco, mais de oitenta municípios no estado são beneficiados pelo ramal principal e pelo Ramal do Agreste (MIDR, 2020). Com a implementação das obras, aproximadamente vinte reservatórios foram construídos para ampliar a oferta hídrica das regiões beneficiadas, no eixo Leste da transposição, Pernambuco foi beneficiado com doze reservatórios de usos múltiplos da água que provém um desenvolvimento do ponto de vista socioambiental e econômico para a região (Figura 8).

Figura 8: Localização dos reservatórios do Projeto de Transposição do Rio São Francisco inseridos dentro do estado de Pernambuco



A: Reservatório Areias, **B:** Reservatório Braúnas, **C:** Reservatório Mandantes, **D:** Reservatório Salgueiro, **E:** Reservatório Muquém, **F:** Reservatório Cacimba Nova, **G:** Bagres, **H:** Reservatório Copiti, **I:** Reservatório Moxotó, **J:** Reservatório Barreiros, **K:** Reservatório Campos, **L:** Reservatório Barro Branco.

Fonte: Autora (2025).

Os reservatórios do Projeto de Integração do Rio São Francisco (PISF) foram planejados considerando a drenagem natural das áreas onde estão inseridos, aproveitando as condições topográficas e hidrológicas locais. As estruturas da transposição foram posicionadas nas linhas de escoamento natural, integrando-se às bacias hidrográficas regionais e maximizando a eficiência no transporte e armazenamento de água, alinhando-se às demandas dos estados beneficiados. Além disso, a localização e construção dos reservatórios levaram em consideração características geomorfológicas e hidrológicas locais, assegurando a sustentabilidade e eficiência do sistema, minimizando os impactos ambientais (ANA, 2022; TECHNE-PROJETEC-BRLi, 2015).

Os doze reservatórios localizados nos limites das bacias hidrográficas dos rios Pajeú e Moxotó estão associados a cursos de água contribuintes. Na Bacia do Rio Pajeú, os reservatórios Salgueiro, Muquém, Cacimba Nova e Bagres (Figura 8 D, E, F e G) recebem água, respectivamente, do Riacho do Salgueiro, Riacho do Muquém, Riacho Maravilha, e, no caso do reservatório Bagres, de dois afluentes principais: o Riacho do Mel e o Riacho do Borges, devido a localização do espelho de água na divisa entre as bacias do Pajeú e do Moxotó.

Na Bacia do Rio Moxotó, os reservatórios Areias, Braúnas, Mandantes, Copiti, Moxotó, Barreiro, Campos e Barro Branco (Figura 8A, B, C, H, I, J, K e L) estão associados aos seguintes afluentes: Riacho das Areias, Riacho do Poço, Riacho Mandantes, Riacho do Copiti, Rio Moxotó, Riacho Barreiro, Riacho Caldeirão e Riacho do Salão, respectivamente.

3.2 Procedimentos Metodológicos

3.2.1 Modelagem hidrológica

A modelagem hidrológica foi realizada utilizando o Sistema de Unidades de Resposta Hidrológica para Pernambuco (SUPer) (super.hawqs.tamu.edu), que consiste em uma ferramenta de avaliação da bacias hidrográficas do estado de Pernambuco, baseada no modelo semi-distribuído e contínuo *Soil & Water Assessment Tool* (SWAT), amplamente utilizado em estudos hidrológicos para avaliação dos impactos do uso do solo e mudanças climáticas (Viana *et al.*, 2020), cujo balanço hídrico é expresso pela seguinte fórmula (Arnold *et al.*, 1998):

$$SW_t = SW_{t-1} + \sum (R - Q - ET - P - QR) \quad (\text{eq. 1})$$

Onde SW_t é o conteúdo de água no tempo t , SW_{t-1} conteúdo de água inicial no solo, R é o volume de chuva, Q é o valor do escoamento superficial, ET é o valor da evapotranspiração, P e a percolação e QR o fluxo de retorno, todas as unidades são expressas em milímetros.

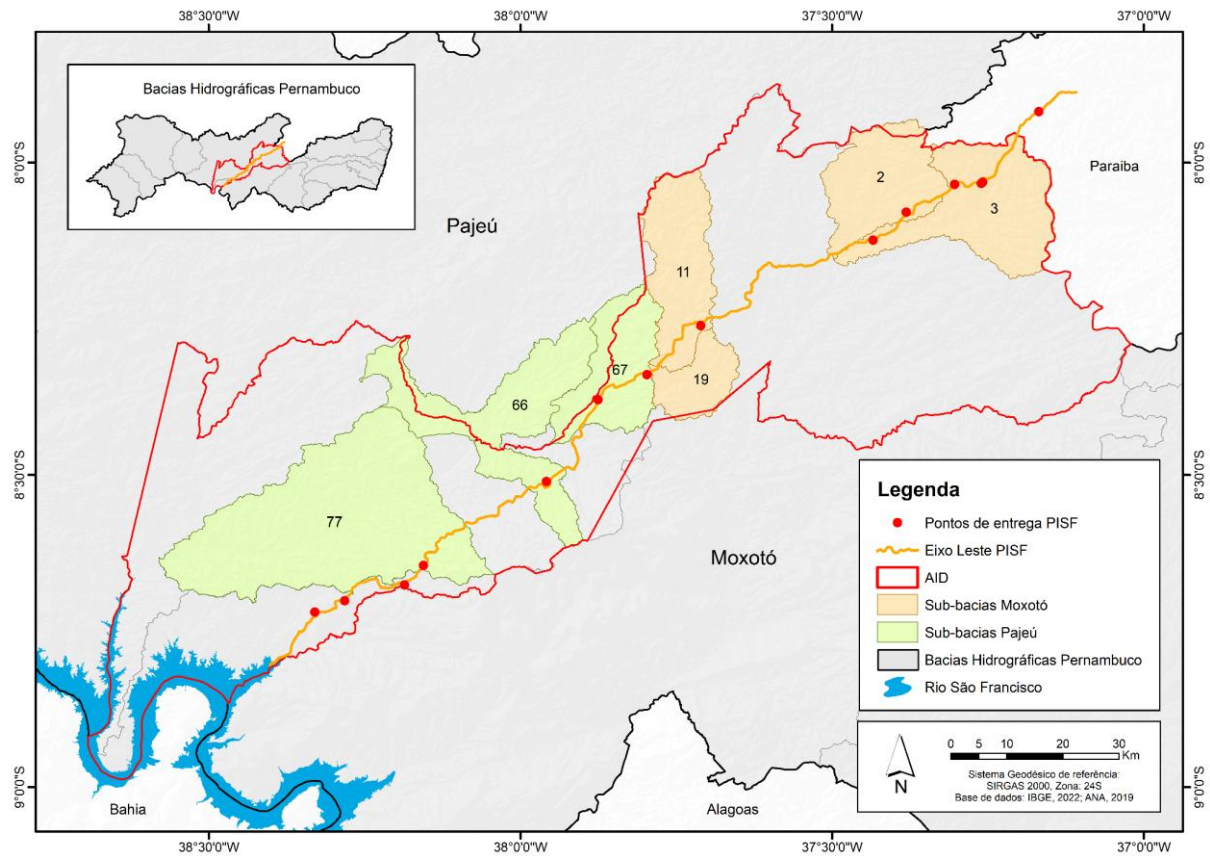
O SUPeR foi utilizado para modelar o balanço hídrico médio mensal na AID do eixo Leste da transposição do Rio São Francisco (PISF), com foco nas sub-bacias hidrográficas em que estão inseridos os portais de entrega do projeto de transposição. Para entrada do modelo foi avaliada toda série de dados de 01/04/1961 a 31/03/2021, considerando um período de cinco anos para o aquecimento do modelo e frequência mensal para os dados de saída. O Ramal Leste do PISF atravessa duas das grandes bacias hidrográficas do estado de Pernambuco: a bacia do Rio Pajeú e a do Rio Moxotó. Para a presente pesquisa foram modeladas as seguintes sub-bacias em que estão inseridos os portais de entrega do PISF descritas no quadro 1 e com localização apresentada na Figura 9.

Quadro 1: Informações das Sub-Bacias e Reservatórios nas Bacias do Rio Pajeú e Rio Moxotó

Bacia	Sub-Bacia	Reservatório	Curso de Água Principal	Município
Rio Pajeú	66	Muquém	Riacho do Navio	Betânia e Floresta
	67	Cacimba Nova, Bagres	Riacho Maravilha	Betânia, Custódia e Floresta
	77	Salgueiro	Riacho do Navio	Floresta
Rio Moxotó	2	Barreiro	Rio Moxotó	Iguaracy e Sertânia
	3	Moxotó, Campos, Barro Branco	Rio Moxotó	Sertânia
	11	Copiti	Riacho do Capiti	Custódia
	19	Bagres	Riacho do Capiti	Custódia e Ibimirim

Fonte: Autora (2025).

Figura 9: Localização das sub-bacias dentro da Área de Influência Direta do Projeto de Transposição do Rio São Francisco no Estado de Pernambuco



Fonte: autora (2025).

Os três primeiros reservatórios do eixo Leste da transposição do Rio São Francisco, especificamente os reservatórios de Areias, Braúnas e Mandantes, não foram modelados nesta pesquisa. Isso se deve ao fato de que o SUPER foi desenvolvido com base na delimitação das Unidades de Planejamento Hídrico definidas pelo Plano Estadual de Recursos Hídricos (PERH/PE) de 1998. A partir de 2022, houve uma atualização na delimitação das bacias hidrográficas do estado de Pernambuco, que passou a incorporar os Grupos de Bacias de Pequenos Rios Interiores (GI) às grandes bacias definidas no plano de 1998 (PROFILL - AlfaSigma, 2022). Como resultado, a modelagem dos reservatórios mencionados não foi possível utilizando o SUPER, uma vez que a ferramenta atualmente não abrange a nova delimitação das unidades de planejamento hídrico do Estado de Pernambuco. Cabe ressaltar que, embora o reservatório de Bagres, cujos principais tributários são o Riacho dos Borges e o Riacho do Mel, tenha sido classificado como pertencente à bacia hidrográfica do Rio Pajeú devido à localização da barragem, seu espelho d'água

encontra-se no limite entre a sub-bacia 67 do Pajeú e a sub-bacia 19 do Moxotó. Por esse motivo, ambas as sub-bacias foram consideradas na análise. Em relação aos municípios descritos no Quadro 1, as sub-bacias, onde estão localizados os reservatórios do PISF, no modelo SWAT, são delimitadas com base nas características físicas do relevo. Por esse motivo, as sub-bacias extrapolam os limites da AID e abrangem áreas de municípios circunvizinhos.

3.2.1.1 Cenários de mudanças climáticas

A simulação dos cenários de mudanças climáticas utilizou dados de temperatura e precipitação fornecidos pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2022), projetados especificamente para a sub-região Nordeste da América do Sul. De acordo com a Contribuição do Grupo de Trabalho II para o Sexto Relatório de Avaliação do IPCC, que aborda os impactos, adaptação e vulnerabilidades, a projeção das mudanças climáticas para a região Nordeste do Brasil indica um aumento significativo da temperatura e uma redução expressiva na precipitação, com potenciais impactos sobre os recursos hídricos e a agricultura.

De acordo com Hoegh-Guldberg *et al.* (2018), no cenário de aquecimento global de 2°C, a temperatura máxima extrema anual na região poderá aumentar em aproximadamente 2,5°C, evidenciando um aquecimento superior à média global. Além disso, projeções apresentadas pelo IPCC (Magrin *et al.*, 2014) indicam uma redução de até 22% no regime de precipitação no Nordeste até 2100, reforçando a tendência de intensificação da aridez e do déficit hídrico na região. Esses valores foram utilizados como dados de entrada na modelagem hidrológica com o SUPER, subsidiando a análise de impactos potenciais no balanço hídrico.

A modelagem permitiu simular cenários futuros sob condições climáticas mais críticas. Dois cenários foram simulados para as sub-bacias que abrigam os portais de entrega do eixo leste do PISF, no cenário de referência, os dados de entrada do modelo não foram modificados, visando avaliar as condições hídricas reais sem alterações climáticas.

1. Cenário de referência (Ref): período entre 1961 e 2021;
2. Cenário com redução (Cen1) de 22% na precipitação e aumento de 2,5°C na temperatura.

Para a elaboração dos cenários, foi utilizada a ferramenta *Climate Sensitivity/Variability Analysis*, que permite a alteração dos dados de entrada relativos à precipitação e à temperatura, representados, respectivamente, em porcentagem e em graus Celsius. O uso dessa ferramenta possibilita a avaliação do comportamento da série histórica de dados conforme as alterações nos dados de entrada do modelo hidrológico. As variáveis de temperatura e precipitação são estimadas no SUPe a partir das seguintes equações 2 e 3 (Tibúrcio *et al.*, 2023).

$$T_{hr} = T_{av} + \frac{(T_{mx} - T_{mn})}{2} \cdot \cos(0.2618 \cdot (hr - 15)) \quad (\text{eq. 2})$$

onde T_{hr} corresponde a temperatura do ar durante a hr do dia, T_{av} é a temperatura média do dia e T_{mx} e T_{mn} são respectivamente temperatura máxima e mínima diária, todos os valores representados em graus celsius ($^{\circ}\text{C}$). As variáveis de precipitação simuladas pelo SUPe são expressas pela seguinte equação 3.

$$R_{day} = \mu_{mon} + 2 \cdot \sigma_{mon} \cdot \left(\frac{\left[\left(\frac{SND_{day} - g_{mon}}{6} \right) \cdot \left(\frac{g_{mon}}{6} \right) + 1 \right]^3 - 1}{g_{mon}} \right) \quad (\text{eq. 3})$$

onde, R_{day} representa a quantidade de chuva em determinado dia, μ_{mon} é a média de precipitação diária para o mês, σ_{mon} é o desvio padrão de precipitação diária para o mês, SND é o desvio padrão normal calculado para o dia g_{mon} é o coeficiente assimétrico para a precipitação diária no mês, todos os valores representados em milímetros.

3.2.1.2 Avaliação da umidade do solo

Os parâmetros de umidade do solo foram obtidos a partir da modelagem hidrológica das sub-bacias de interesse, utilizando o SUPe (super.hawqs.tamu.edu). O SUPe permite a obtenção das séries de dados de todas as variáveis referentes a modelagem das bacias a partir da consulta dos dados de saída do modelo, são fornecidos dados tabulares, gráficos e mapas para todas as variáveis. Todo o banco de dados disponível na plataforma foi avaliado, abrangendo o período de 1961 a 2021. Além disso, os cenários de mudanças climáticas projetados para as sub-bacias foram analisados, especificamente os resultados referentes a variável de umidade do solo

(SW). Conforme descrito na etapa anterior, os dados de entrada referentes à temperatura e à precipitação foram ajustados para a simulação dos diferentes cenários.

No SWAT, a umidade do solo é calculada com base no balanço hídrico em cada camada do solo, considerando a infiltração (precipitação menos escoamento superficial), evapotranspiração (evaporação do solo e transpiração das plantas), escoamento lateral, redistribuição vertical de água e percolação para camadas inferiores ou aquíferos. Cada camada tem limites definidos por sua capacidade de campo e ponto de murcha, com fluxos controlados pela condutividade hidráulica e gradientes de umidade. O modelo ajusta o conteúdo de água do solo dependendo das entradas e saídas, representando com precisão o comportamento hídrico em função do clima, solo e vegetação (Arnold *et al.*, 2012; Chagas *et al.*, 2022).

3.2.2 Cálculo da evapotranspiração diária utilizando o modelo SEBAL

3.2.2.1 Obtenção das imagens de satélite

Foram utilizadas imagens do sensor TM (*Thematic Mapper*) do satélite Landsat 5 e do sensor OLI (*Operational Land Imager*) do satélite Landsat 8, disponíveis gratuitamente na plataforma USGS *Earth Explorer* (earthexplorer.usgs.gov). As cenas foram selecionadas para garantir uma análise temporal representativa das mudanças ambientais na região geográfica de influência do PISF. A escolha levou em consideração a série de imagens de satélite disponíveis, com o intuito de refletir as condições iniciais, intermediárias e atuais de modificação do uso e cobertura do solo, o que possibilita a identificação de tendências ao longo de quase quatro décadas de transformações socioambientais, políticas e econômicas nos municípios que hoje compõem a AID. Ressalte-se que os anos selecionados coincidem com marcos institucionais e operacionais relevantes na implantação do PISF: 1985 marca o início da série histórica de imagens *Landsat*; 2005 corresponde à aprovação do projeto pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), antecedendo o início das obras em 2007; e 2023 reflete o estágio atual, com o Eixo Leste em operação, permitindo a análise dos impactos mais recentes da transposição na região. A cobertura de nuvens e a proximidade entre as datas de aquisição foram consideradas para garantir a acurácia dos resultados. Os valores orbitais, pontos e datas de passagem das imagens utilizadas estão apresentados no Quadro 2.

Quadro 2: Informações das imagens Landsat utilizadas no estudo

Imagem	Data de Passagem	Órbita	Ponto
Landsat 5 - 1985	26/10/1985	215	66
	01/10/1985	216	66
Landsat 5 - 2005	02/11/2005	215	66
	24/10/2005	216	66
Landsat 8 - 2023	03/10/2023	215	66
	26/10/2023	216	66

Fonte: Autora (2025)

Foram coletadas imagens para os anos 1985, 2005 e 2023. O critério para seleção das cenas levou em consideração o período seco entre agosto e outubro, devido às dificuldades na obtenção de cenas com baixa cobertura de nuvens fora do período de menor incidência de chuvas na área de estudo.

As imagens selecionadas foram empregadas no cálculo do balanço de energia da superfície. Foram avaliados os índices de vegetação, saldo de radiação ($W\ m^{-2}$) e a evapotranspiração diária (ET), expressa em milímetros por dia. Os resultados permitirão analisar as variações na cobertura vegetal da área de estudo e a resposta do fluxo de energia da superfície, buscando compreender como essas variáveis influenciam a demanda hídrica na região.

3.2.2.2 Obtenção dos dados climáticos

Os dados meteorológicos foram coletados das estações automáticas de Floresta e Arcoverde, ambas localizadas dentro do limite das cenas Landsat utilizadas na pesquisa. As coordenadas geográficas das Plataformas de Coleta de Dados (PCDs) utilizadas na pesquisa são: Floresta (Latitude: 8°35'56" S, Longitude: 38°35'03" W) e Arcoverde (Latitude: 8°26'01" S, Longitude: 37°03'20" W). Os dados foram obtidos por meio do Banco de Dados Meteorológicos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) (<https://bdmep.inmet.gov.br/>). Para o estudo, foram selecionados apenas os registros horários correspondentes às datas de aquisição das

imagens de satélite utilizadas, no período compreendido entre 14 de setembro de 2008 e 31 de dezembro de 2023. As variáveis coletadas incluem Insolação solar, temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento e pressão atmosférica, que serão utilizadas para a correção e cálculo dos componentes do balanço de energia. Devido à indisponibilidade de dados meteorológicos horários compatíveis para ambas as cenas para os anos de 1985 e 2005, não foi possível realizar o cômputo do fluxo de calor sensível (H) no modelo SEBAL para as imagens. O cálculo de H é fundamental para a calibração das imagens e indispensável à obtenção dos resultados de evapotranspiração e exige dados meteorológicos horários dentro dos limites da imagem de satélite.

3.2.2.3 Pré-processamento das cenas do Landsat 5 e 8

As imagens de satélite foram submetidas a correções radiométricas, para converter os valores de números digitais (DN) para valores de radiância e refletância, removendo efeitos atmosféricos. Os ajustes foram realizados aplicando os coeficientes de calibração fornecidos nos metadados das imagens. Foi realizada a composição das bandas 1 a 7 para o Landsat 5, e 2 a 7 para o Landsat 8, criando uma imagem multiespectral para cada data de aquisição. As cenas também foram reprojadas para o hemisfério Sul. A banda termal do Landsat 8 (banda 10) foi submetida a uma correção radiométrica independente, necessária para sua aplicação no cálculo da temperatura da superfície terrestre. Dessa forma, a composição desta banda com as demais não foi realizada, considerando as particularidades de seu processamento.

Para cálculo da Radiância espectral do Landsat 5 e 8 foram utilizadas as equações 4 e 5, respectivamente, propostas por Markham e Baker (1987).

$$L_{\lambda i TM} = a_i \frac{b_i - a_i}{255} ND \quad (\text{eq. 4})$$

$$L_{\lambda i OLI} = add_{radi} + Mult_{radi} \cdot ND_i \quad (\text{eq. 5})$$

onde, a_i e b_i são as radiâncias espectrais mínima e máxima; ND é a intensidade do pixel, i corresponde às bandas dos satélites. add_{radi} e $Mult_{radi}$ representa o fator aditivo e multiplicativo da reflectância para cada banda disponíveis no arquivo MTL, respectivamente.

Para o cálculo da reflectância foi utilizada a equação de Bastiaanssen *et al.* (1998). Para obtenção dos valores de $\cos(z)$ e d_r foram utilizadas as equações de Allen *et al.* (2002) e Silva; Lopes e Azevedo (2005).

$$\rho_{\lambda i TM} = \frac{\pi \cdot L_{\lambda i}}{K_{\lambda i} \cdot \cos Z \cdot d_r} \quad (\text{eq. 8})$$

$$\rho_{\lambda i OLI} = \frac{add_{radi} + Mult_{radi} \cdot ND_i}{\cos Z \cdot d_r} \quad (\text{eq. 7})$$

$$d_r = 1 + 0,033 \cos(DSA \cdot 2\pi / 365) \quad (\text{eq. 8})$$

$$\cos z = \cos\left(\frac{\pi}{2} - E\right) \quad (\text{eq. 9})$$

onde $L_{\lambda i}$ é o resultado da calibração radiométrica, $\cos(Z)$ é o cosseno do ângulo zenital solar, e d_r é o inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol em unidade astronômica para cada dia específico do ano.

Tendo em vista que as cenas Landsat que cobrem a AID estão distribuídas em diferentes órbitas e pontos, todo o processamento das imagens e o cálculo dos índices foram realizados de forma individual para cada cena. Para garantir a delimitação precisa da área de estudo, o limite da AID, que abrange os três municípios integrantes da região de influência do PISF, foi segmentado de acordo com os limites das cenas Landsat. Como a cobertura total da área de estudo requer a utilização de duas cenas, conforme descrito no Quadro 2, as imagens foram previamente empilhadas, reprojctadas e, em seguida, recortadas com base nos limites definidos da AID, garantindo a padronização e a consistência espacial da análise. A abordagem foi necessária devido às diferentes datas de aquisição, órbitas e pontos das imagens, uma vez que o processamento dos componentes do modelo SEBAL requer calibração específica com base nas informações para cada imagem.

3.2.2.4 Cálculo dos Componentes do Balanço de Energia

As imagens foram processadas utilizando o método *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (SEBAL) para estimar a evapotranspiração diária. O modelo de balanço de energia SEBAL foi proposto por Bastiaanssen *et al.* (1998) para estimativa da evapotranspiração. O cálculo do balanço de radiação da superfície é um processo complexo que envolve várias etapas. Essas etapas incluem a realização de correções

radiométricas das cenas, o cálculo de parâmetros biofísicos e as diferentes fases para determinação dos valores de Rn, G e H.

Para o cômputo do albedo planetário (α_{TOA}), isto é, o albedo não ajustado a transmissividade atmosférica, que é obtida pela combinação linear das reflectâncias monocromáticas, obtido a partir da equação; onde $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4, \rho_5$ e ρ_7 são os albedos planetários das bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7.

$$\alpha_{toa,jTM} = 0,293\rho_1 + 0,274\rho_2 + 0,233\rho_3 + 0,157\rho_4 + 0,033\rho_5 + 0,011\rho_7 \quad (\text{eq.10})$$

$$\alpha_{toa,jOLI} = 0,300\rho_2 + 0,277\rho_3 + 0,233\rho_4 + 0,143\rho_5 + 0,036\rho_6 + 0,012\rho_7 \quad (\text{eq.11})$$

É necessário também o cômputo do albedo da superfície ou albedo corrigido para os efeitos atmosféricos α , pela equação 12.

$$\alpha = \frac{\alpha_{toa} - \alpha_p}{\tau_{SW}^2} \quad (\text{eq.12})$$

onde α_{toa} é o albedo planetário, α_p é a da radiação solar refletida pela atmosfera, que varia entre 0,025 e 0,04, mas para o modelo SEBAL é recomendado o uso do valor de 0,03, com base em Bastiaanssen (2000), e τ_{sw} é a transmissividade atmosférica que para condições de céu claro, pode ser obtida por Allen *et al.* (2002).

$$\tau_{SW} = 0,75 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot z \quad (\text{eq. 13})$$

onde z representa a altitude de cada pixel (m). Para obter esses valores, foi utilizado o Modelo Digital de Elevação (MDE) do projeto Brasil em Relevo, da EMBRAPA (cnpm.embrapa.br/projetos/relevobr/). Para garantir a cobertura completa da área de estudo, foram empregadas quatro cenas SRTM (SC-24-XA, SC-24-XB, SC-24-XC e SC-24-XD). Os rasters de relevo foram mosaicados e posteriormente reamostrados para uma resolução espacial de 30 metros, assegurando compatibilidade com o tamanho do pixel das imagens Landsat. Por fim, o MDE foi reprojetoado para o sistema de coordenadas da área de estudo (SIRGAS 2000 24S) e recortado de acordo com seus limites.

Para os índices de vegetação, é necessário o cálculo de NDVI, SAVI e IAF. O Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) é obtido por meio da razão

entre a diferença das refletividades do Infravermelho próximo (NIR) e do vermelho (R), pela soma das mesmas.

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (\text{eq. 14})$$

Para o cálculo do Índice de Vegetação Ajustado para os Efeitos do Solo (SAVI), foi utilizada a expressão de (Huete, 1988):

$$SAVI = \frac{(1+L)(NIR-R)}{L+NIR+R} \quad (\text{eq. 15})$$

onde L corresponde ao fator de correção, cujo valor adotado no estudo foi 0,5 (Huete; Warrick, 1990; Boegh *et al.*, 2002).

O Índice de Área Foliar (IAF) é definido pela razão entre a área foliar de toda a vegetação por unidade de área utilizada por essa vegetação. O índice foi calculado pela seguinte equação empírica obtida por Allen *et al.* (2002).

$$IAF = \frac{\ln \ln \left(\frac{0,69 - SAVI}{0,91} \right)}{0,91} \quad (\text{eq. 16})$$

Para a obtenção da temperatura da superfície e radiação de onda longa é necessário a obtenção dos valores de emissividade da superfície no domínio espectral da banda termal (ε_{NB}) e no domínio da banda larga (ε_0). Segundo Allen *et al.* (2002), as emissividades são obtidas a partir das equações 17 e 18.

$$\varepsilon_{NB} = 0,97 + 0,00331 \cdot IAF \quad (\text{eq. 17})$$

$$\varepsilon_0 = 0,95 + 0,01 \cdot IAF \quad (\text{eq. 18})$$

Para a obtenção da temperatura da superfície T_s foram utilizadas a radiância espectral da banda termal $L_{\lambda b}$ e a emissividade (ε_{NB}) obtida na etapa anterior. Dessa forma, obtém-se a temperatura da superfície, em Kelvin, pela equação 19.

$$T_s = \frac{K_2}{\ln \ln \left(\frac{\varepsilon_{NB} K_2}{L_{\lambda b}} + 1 \right)} \quad (\text{eq.19})$$

onde “Ts” representa Temperatura da superfície em Kelvin; “K1” corresponde a Constante de Calibração da Banda 10 (774.8853); “K2” também remete a Constante de Calibração da Banda 10, para o OLI. Para o sensor TM os valores de K1 (607,76) e K2 (1260,56).

Para o cálculo do Saldo de Radiação (Rn), é necessário a estimativa da radiação de onda longa emitida pela superfície ($R_{L\uparrow}$), radiação de onda curta incidente ($R_{s\downarrow}$), e radiação de onda longa incidente emitida ($R_{L\downarrow}$), estimadas a partir das equações 20-22, propostas por Stefan-Boltzman e Allen *et al.* (2002).

$$R_{L\uparrow} = \varepsilon_0 \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad (\text{eq. 20})$$

$$R_{s\downarrow} = S \cdot \cos Z \cdot d_r \cdot \tau_{sw} \quad (\text{eq. 21})$$

$$R_{L\downarrow} = \varepsilon_a \cdot \sigma \cdot T_a^4 \quad (\text{eq. 22})$$

onde (ε_0) é a emissividade de cada pixel; σ é a constante de Stefan-Boltzman ($\sigma = 5,64 \cdot 10^{-8}$) e T_s é a temperatura da superfície; S é a constante solar ($S = 1367$), Z é ângulo zenital solar, d_r é o inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol e τ_{sw} é a transmissividade atmosférica; ε_a é a emissividade atmosférica obtida por: $\varepsilon_a = 0,85(-\ln \tau_{sw})^{0,09}$ (Allen *et al.*, 2002) e T_a é a temperatura do ar em kelvin.

O saldo de radiação na superfície (Rn) é computado utilizando-se a equação 23 do balanço de radiação à superfície, se utilizando das radiações obtidas na etapa anterior:

$$Rn = R_{s\downarrow} - \alpha R_{s\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \varepsilon_o) R_{L\downarrow} \quad (\text{eq. 23})$$

onde $R_{L\uparrow}$, $R_{s\downarrow}$ e $R_{L\downarrow}$ são os valores de radiação estimados nas equações (20, 21 e 22) e α o albedo corrigido de cada pixel (eq. 12).

O fluxo de calor no solo (G), pode ser obtido segundo a equação empírica 24 desenvolvida por Bastiaanssen (2000), que representa os valores próximos ao meio-dia.

$$G = [T_s(0,0038 + 0,0074 \alpha)(1 - 0,98 \text{NDVI}^4)] Rn \quad (\text{eq. 24})$$

onde T_s é a temperatura da superfície ($^{\circ}\text{C}$), α é o albedo da superfície e NDVI é o índice de vegetação da diferença normalizada, todos computados pixel a pixel.

O processo de estimação do fluxo de calor sensível (H) é uma etapa extensa que necessita de dados meteorológicos no interior das cenas estudadas e conhecimento dos pixels âncoras (pixel quente e frio) para calibração do modelo. No SEBAL o cálculo é realizado utilizando a equação 25 de Bastiaanssen (1998).

$$H = \rho c_p \frac{(a + bT_s)}{r_{ah}} \quad (\text{eq. 25})$$

onde ρ é a massa específica do ar, C_p é calor específico do ar ($1004 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$), a e b são constantes de calibração da diferença da temperatura entre dois níveis Z_1 e Z_2 , T_s é a temperatura da superfície ($^{\circ}\text{C}$) e r_{ah} é a resistência aerodinâmica ao transporte de calor.

A resistência aerodinâmica r_{ah} é calculada admitindo-se a atmosfera em condições de estabilidade neutra, a partir da equação 26.

$$r_{ah} = \frac{\ln\left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)}{u_* \cdot k} \quad (\text{eq. 26})$$

onde Z_1 e Z_2 são as alturas em metros acima da superfície. Admitindo-se $Z_1 = 0,1\text{m}$ e $Z_2 = 2,0\text{m}$, u_* é a velocidade de fricção e K é a constante de Von Karman (0,41).

A velocidade de fricção u_* é determinada usando o perfil logaritmo do vento para a condição de estabilidade neutra, onde k é a contante de Von Karman (0,41), u_x é a velocidade do vento na altura Z_x e Z_{0m} é a coeficiente de rugosidade em metros.

$$u_* = \frac{ku_x}{\ln\left(\frac{Z_x}{Z_{0m}}\right)} \quad (\text{eq. 27})$$

Em seguida é estimada a velocidade do vento ano nível de $Z = 200$ metros, chamada de *blending height*, onde se assume que os efeitos da rugosidade da superfície são desprezíveis, obtido a partir da equação 28.

$$u_{100} = u_* \frac{\ln\left(\frac{100}{Z_{0m}}\right)}{k} \quad (\text{eq. 28})$$

Onde K é a constante de Von Karman (0,41), Z_{0m} é a coeficiente de rugosidade em metros e u_* é a velocidade de fricção obtida na etapa anterior.

Com a hipótese de que u_{200} é constante em toda a cena, pode ser obtida a velocidade de fricção para cada pixel da imagem, por meio da equação 29.

$$u_* = \frac{ku_{100}}{\ln\left(\frac{100}{Z_{0m}}\right)} \quad (\text{eq. 29})$$

onde Z_{0m} (m) foi obtida em função do SAVI segundo a equação (30) desenvolvida por Bastiaanssen (2000).

$$Z_{0m} = \exp(-5,809 + 5,62 \text{ SAVI}) \quad (\text{eq. 30})$$

O computo da diferença de temperatura próxima à superfície dT (°C) para cada pixel é computada pelo SEBAL por meio de uma relação linear entre dT e T_s (temperatura da superfície), onde os coeficientes **a** e **b** são obtidos por meio dos pixels âncoras (quente e frio).

$$dT = a + bT_s \quad (\text{eq. 31})$$

O pixel “frio” da imagem é escolhido admitindo-se que este se encontra numa área bem irrigada, onde se assume que o fluxo de calor sensível é nulo ($H_{frio} = 0$) e o fluxo de calor latente λET_{frio} é dado pela equação 32.

$$\lambda ET_{frio} = Rn - G \quad (\text{eq. 32})$$

Para a determinação do pixel “quente” é escolhido em uma área de solo exposto, onde se assume que o fluxo de calor latente é nulo ($\lambda_{quente} = 0$) e o fluxo de calor sensível H_{quente} é dado pela equação 33.

$$H_{quente} = Rn - G = \frac{\rho c_p (a + bT_s)}{r_{ah}} \quad (\text{eq. 33})$$

onde T_s , Rn , G , r_{ah} são obtidos exatamente no pixel quente da imagem. Com base nesses valores, obtém-se, no pixel quente: $a + bT_s = r_{ah}(Rn - G)/\rho c_p$. Como no pixel frio $dT=0$, ou seja $a + bT_s = 0$, tem-se um sistema com duas equações e duas

incógnitas, o que possibilita o cálculo de a e b . Logo, pode-se obter H , segundo a equação de H . Os valores iniciais do fluxo de calor sensível (H) são ajustados iterativamente com base nas condições atmosféricas e na turbulência, utilizando a teoria da similaridade de Monin-Obukhov. O pixel "quente" serve como referência para refinar o cálculo de H em toda a área de estudo. O comprimento de Monin-Obukhov é calculado em função dos fluxos de calor e de momentum a partir da equação 34.

$$L = -\frac{\rho c_p u_*^3 T_s}{kgH} \quad (\text{eq. 34})$$

onde ρ é a densidade do ar ($1,15 \text{ Kg m}^{-3}$), c_p é o calor específico do ar, u_* é a velocidade de fricção de cada pixel das imagens, T_s é a temperatura da superfície (K), g é modulo do campo gravitacional terrestre ($9,81 \text{ ms}^{-2}$) e H é o fluxo de calor sensível, obtido inicialmente considerando a condição de neutralidade. Quando o valor de $L < 0$ a atmosfera é considerada instável, se $L > 0$ a atmosfera é considerada estável e se $L = 0$ a atmosfera é considerada neutra. Com essa informação, é estimado o transporte de momentum (ψ_m) e calor (ψ_h), utilizando-se das fórmulas de Paulson (1970) e Webb (1970).

1) Se $L < 0$ (condição de instabilidade), são aplicadas as equações 35-37.

$$\psi_{m(100m)} = 2 \ln \left(\frac{1 + x_{(100m)}}{2} \right) + \ln \left(\frac{1 + x_{(100m)}^2}{2} \right) - 2 \arctg(x_{(100m)}) + 0,5 \pi \quad (\text{eq. 35})$$

$$\psi_{h(2m)} = 2 \ln \left(\frac{1 + x_{(2m)}^2}{2} \right) \quad (\text{eq. 36})$$

$$\psi_{h(0,1m)} = 2 \ln \left(\frac{1 + x_{(0,1m)}^2}{2} \right) \quad (\text{eq. 37})$$

onde $x_{(100m)}$, $x_{(2m)}$ e $x_{(0,1m)}$ são estimados a partir das equações 38-40.

$$x_{(100m)} = \left(1 - 16 \frac{100}{L} \right)^{0,25} \quad (\text{eq. 38})$$

$$x_{(2m)} = \left(1 - 16 \frac{2}{L}\right)^{0,25} \quad (\text{eq. 39})$$

$$x_{(0,1m)} = \left(1 - 16 \frac{0,1}{L}\right)^{0,25} \quad (\text{eq. 40})$$

2) Se $L > 0$ (condição de estabilidade), são aplicadas as equações 41-43.

$$\psi_{m(200m)} = -5 \left(\frac{100}{L} \right) \quad (\text{eq. 41})$$

$$\psi_{m(2m)} = -5 \left(\frac{2}{L} \right) \quad (\text{eq. 42})$$

$$\psi_{m(0,1m)} = -5 \left(\frac{0,1}{L} \right) \quad (\text{eq. 43})$$

3) Se $L = 0$ (condição de neutralidade), é aplicada a equação 44.

$$u_* = \frac{u_{100} \cdot k}{\ln \left(\frac{100}{Z_{0m}} \right) - \psi_{m(100m)}} \quad (\text{eq. 44})$$

onde u_{100} é a velocidade do vento a 200 m, K é a constante de von Karman (0,41), Z_{0m} é o coeficiente de rugosidade de cada pixel (m) e $\psi_{h(100m)}$ é a correção da estabilidade para o transporte de momentum a 200 m.

Tendo obtido u_* corrigido, foi obtido o valor corrigido para a resistência aerodinâmica ao transporte de calor r_{ah} a partir da equação 45.

$$r_{ah} = \frac{\ln \frac{Z_2}{Z_1} - \psi_{h(Z_2)} + \psi_{h(Z_1)}}{u_* \cdot k} \quad (\text{eq. 45})$$

onde $Z_2 = 2,0 \text{ m}$, $Z_1 = 0,1 \text{ m}$, e $\psi_{h(Z_1)}$ são as correções de estabilidade para o transporte de calor a 2m e a 0,1m, respectivamente.

Com as estimativas de Rn , G e H instantâneo, pode ser estimado o fluxo de calor latente (LE), calculado como a diferença entre os três valores (equações 23-25).

$$LE = Rn - G - H \quad (\text{eq. 46})$$

Para obter o valor final de Evapotranspiração diária ($ET_{diária}$) é estimada a fração evaporativa (FE) a partir da equação 47 (Crago, 1996).

$$FE = \frac{LE}{Rn - G} \quad (\text{eq. 47})$$

A partir do resultado obtido de FE é obtida a evapotranspiração diária, considerando que o valor da fração evaporativa é constante durante o dia. O cálculo de ET diária é realizado com base na equação 48, onde Rn_{24h} é a radiação diária estimada por meio do método de Bezerra *et al.* (1987) e λ é o calor latente de evaporação (kJ kg⁻¹).

$$ET_{24h} = 0,0864 FE \frac{Rn_{24h}}{\lambda} \quad (\text{eq. 48})$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4. 1 Balanço hídrico médio mensal nas sub-bacias

As sub-bacias em que estão inseridos os portais de entrega do Eixo Leste do PISF apresentam semelhanças em termos de cobertura e uso do solo, pedologia e relevo (Figura 10). No entanto, apesar dessas semelhanças, existem variações climáticas e ambientais que as distinguem, especialmente em relação à distribuição e à predominância das características fisiográficas, as quais influenciam diretamente sobre o balanço hídrico médio mensal e suas variáveis resultantes. Essas particularidades têm implicações importantes para a gestão dos recursos hídricos. Nesse sentido, Luz e Galvínio (2022) avaliam que a caracterização detalhada de bacias hidrográficas é fundamental para o monitoramento e a modelagem dessas áreas, aspectos essenciais na gestão de recursos hídricos. A modelagem, incluindo o uso da água e o acesso a informações hidrológicas, é crucial para a tomada de decisões tanto por autoridades públicas quanto pela sociedade. No Brasil, temas como a vulnerabilidade hidroclimática e alternativas para a seca no semiárido nordestino são de grande importância para atender às necessidades hídricas da região e melhorar a situação socioeconômica. Franca *et al.* (2021), corroborando as afirmações das autoras, ressaltam que o balanço hídrico é uma ferramenta crucial para a gestão dos recursos hídricos e o planejamento agropecuário.

As Unidades de Respostas Hidrológicas (HRUs) das sub-bacias analisadas foram definidas por meio da sobreposição dos mapas de uso e tipos de solo com as informações de declividade. Esse processo resultou, em média, em sete HRUs por bacia. O número de HRUs pode variar entre as sub-bacias, devido a características homogêneas de uso e ocupação do solo, tipos de solo e declividade. Entre as principais classes de uso do solo identificadas pelo SWAT, dentre as sub-bacias estão presentes CRWO, que, de acordo com Viana *et al.* (2020), pode ser associada ao uso referente à agricultura e a Caatinga, e SPAS se refere a “Summer pasture” conforme o manual do SWAT, e pode ser entendida como pastagem. Nas sub-bacias analisadas, observa-se a predominância da classe SPAS, que abrange 50% ou mais da área em diversas sub-bacias. Essa característica reflete as limitações naturais do semiárido, que impõem restrições significativas ao desenvolvimento agrícola na região.

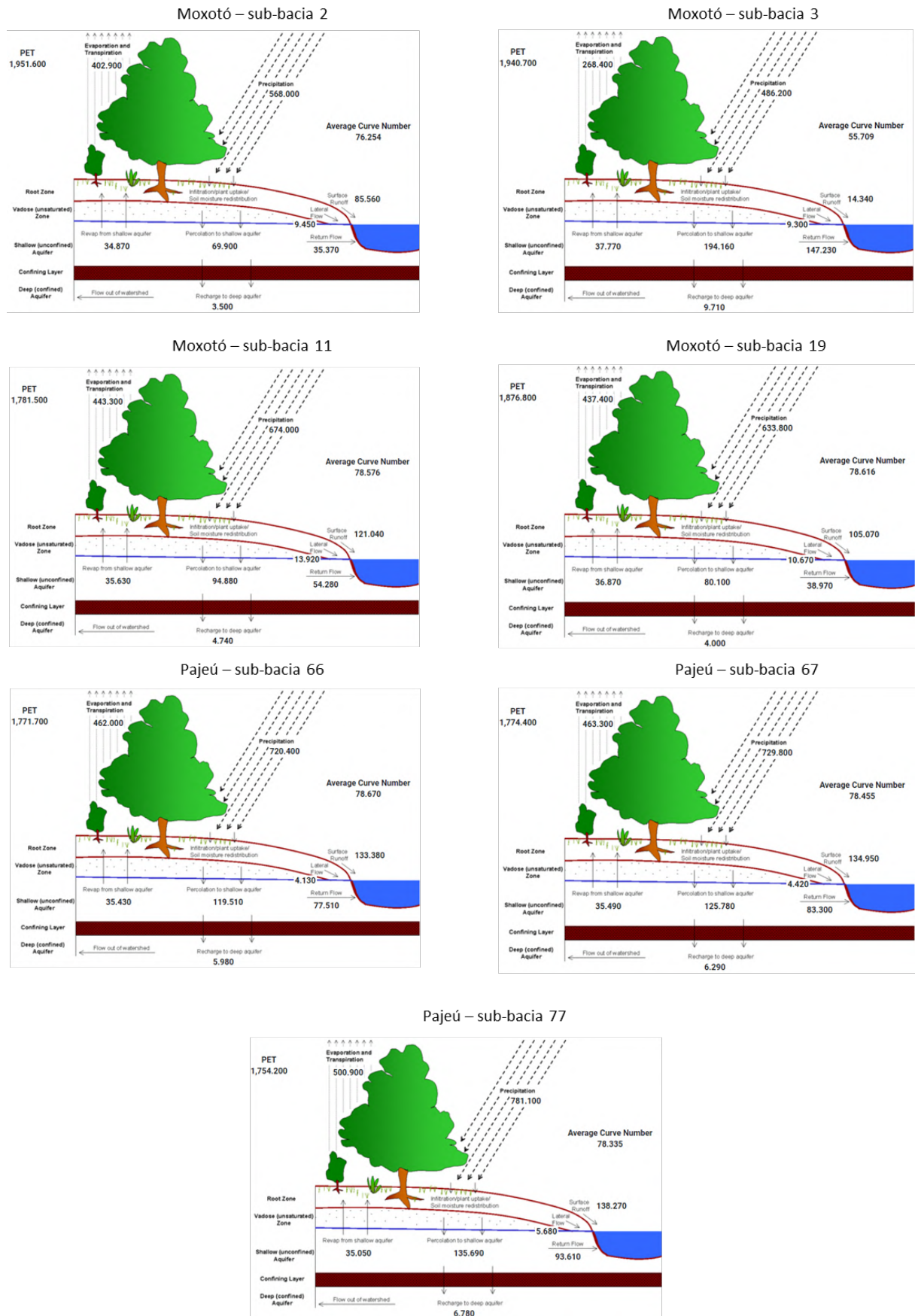
No que se refere aos tipos de solo, predominam na região os Neossolos Litólicos (RL) e Luvisolos Crômicos (TC), conforme identificado pelo SWAT. Ambos

os tipos apresentam restrições agrícolas específicas devido às suas características pedológicas. Araújo Filho *et al.* (2022) destacam que os Neossolos Litólicos são solos pouco desenvolvidos, que preservam características mineralógicas semelhantes ao material de origem. Esses solos possuem ampla distribuição geográfica no domínio da Caatinga e estão frequentemente associados a áreas pedregosas e rochosas, especialmente na Depressão Sertaneja. Os Luvisolos são solos minerais eutróficos, caracterizados por sua pouca profundidade e presença de horizontes rasos. Além disso, conforme observado por Saraiva (2016), os Luvisolos apresentam alta suscetibilidade à erosão e, no semiárido, seu uso está predominantemente relacionado à pecuária e à manutenção da vegetação nativa.

O balanço hídrico médio mensal atual das sub-bacias está apresentado na Figura 10. Relacionando os componentes do balanço, percebe-se que em todas as sub-bacias há um déficit hídrico acentuado devido às altas taxas evapotranspiração em relação à precipitação, mais da metade da água que entra no sistema é perdida para a atmosfera. Embora haja variabilidades em relação às respostas do balanço hídrico entre as sub-bacias do Rio Pajeú e Moxotó, toda a região de análise enfrenta restrições em menor ou maior grau em relação à disponibilidade hídrica natural.

As sub-bacias do Moxotó (Sub-bacias 2, 3, 11, 19) apresentam os menores níveis de precipitação, variando entre 486 mm e 674 mm, sendo a sub-bacia dos reservatórios do Moxotó, Campos e Barro Branco (sub-bacia 3) a que registra os valores mais baixos. A evapotranspiração também apresenta valores menores, em comparação com as sub-bacias do Rio Pajeú. No entanto, é importante destacar que, apesar dos menores volumes absolutos de evapotranspiração, a quantidade de água perdida para a atmosfera é significativa em relação ao volume total de água que entra no sistema. Em média, mais de 50% da água é perdida por evapotranspiração entre as sub-bacias do Moxotó. As sub-bacias que apresentam as maiores razões de evapotranspiração são as do reservatório Barreiro (sub-bacia 2) e do reservatório Bagres (sub-bacia 19), onde 70% da água que entra no sistema é perdida por evapotranspiração.

Figura 10: Representação do balanço hídrico de referência das sub-bacias



Fonte: Autora (2025)

Os resultados observados refletem tendências identificadas em estudos recentes que avaliam o balanço hídrico no semiárido. Barros *et al.* (2024) avaliou o balanço hídrico a nível de unidade de resposta hidrológica (HRU) para a sub-bacia do reservatório do Muquém, no Eixo Leste do PISF, para o período anterior (1961-2008) e posterior (2009-2021) a construção do canal de transposição. Os resultados indicam que, no cenário anterior à construção, 65% da precipitação foi perdida por evapotranspiração, 18% foram convertidos em escoamento superficial e 16% percolaram no solo. No cenário posterior, a perda por evapotranspiração aumentou para 73%, enquanto o escoamento superficial diminuiu para 14% e a percolação para 12%. Esses resultados sugerem que as restrições hídricas no semiárido veem se acentuando em decorrência de diferentes fatores, reduzindo a disponibilidade de água para fluxos superficiais e subterrâneos, intensificando a escassez hídrica na região.

Outras pesquisas também avaliaram o balanço hídrico no semiárido pernambucano. Os resultados de Luz e Galvêncio (2022) mostram que o balanço hídrico médio anual da sub-bacia do riacho Milagres, na bacia de Terra Nova-PE, apresenta uma significativa perda de água por evapotranspiração, representando 41% da precipitação total. Apenas 3% da precipitação se converte em escoamento superficial, enquanto 56% percola no subsolo. A precipitação média anual foi de 638 mm, com evapotranspiração potencial de 2676 mm e evapotranspiração real de 260 mm. Ainda, a sub-bacia apresenta um fluxo de retorno elevado, com 37% da água percolada retornando à superfície por poços artesianos e vales. As autoras destacam, que nos últimos 20 anos, houve uma redução significativa no escoamento superficial, que raramente ultrapassou 10 mm, com muitos meses registrando vazão zero, indicando o aumento das secas hidrológicas. Em 53% do ano, a vazão foi de 0,3 m³/s, com 0,05 m³/s sendo perdidos por evaporação.

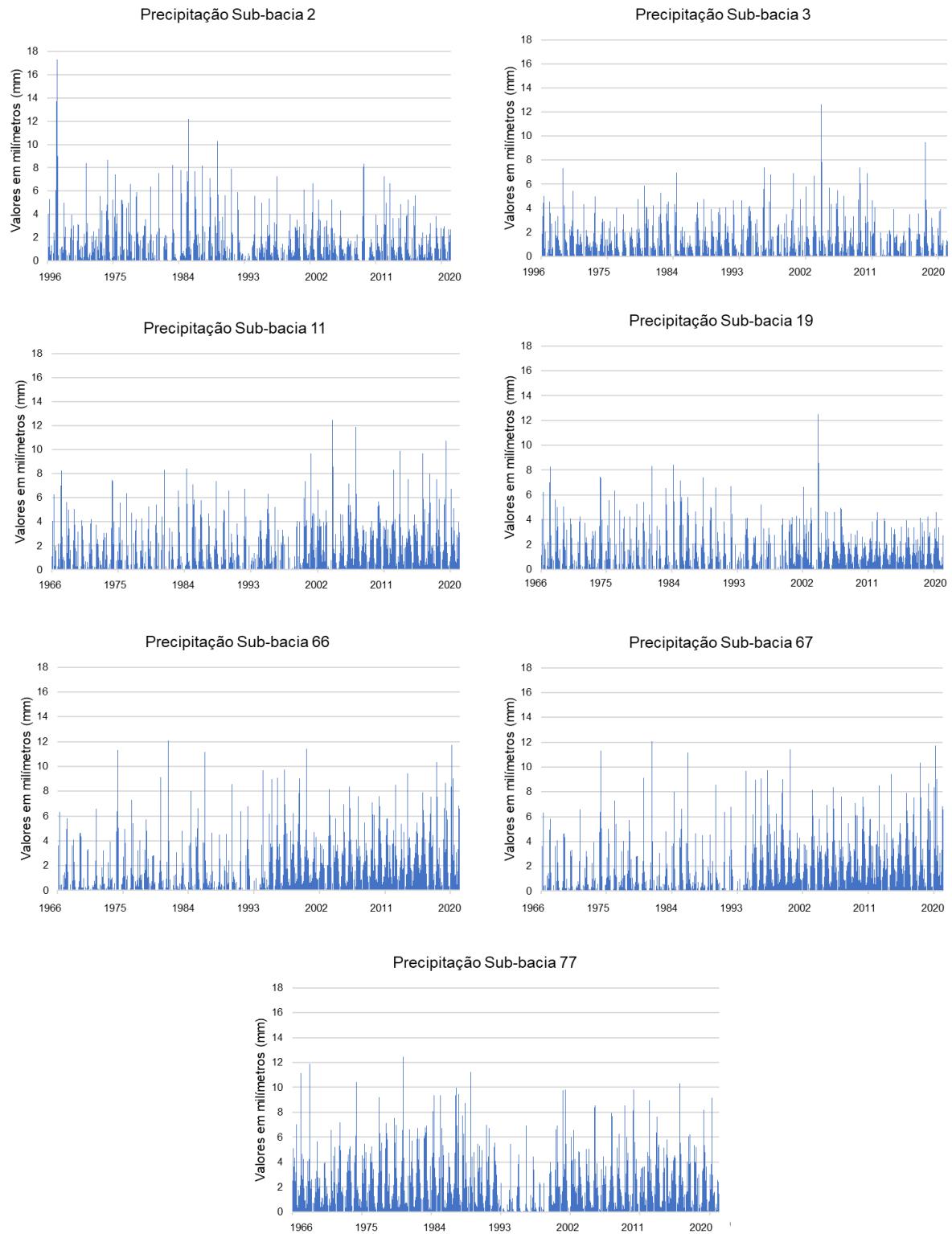
Soares (2023) avaliou o balanço hídrico para a sub-bacia do Riacho Cachoeira, na bacia do rio Pajeú e identificou que 42% da precipitação é perdida por evapotranspiração, 44% é percolada no subsolo, e apenas 13,4% do total corresponde a fluxos superficiais. Os resultados dos autores indicam que as bacias hidrográficas no semiárido pernambucano apresentam déficit hídrico significativo, impactando diretamente a disponibilidade de água para os diferentes usos.

Por outro lado, as sub-bacias do Pajeú (66, 67, 77) apresentam níveis mais elevados de precipitação, variando de 720,4 mm a 781,1 mm, maiores valores absolutos de evapotranspiração, que variam entre 462 mm e 500 mm. No entanto, a

razão da perda de água para a atmosfera é mais homogênea em relação às sub-bacias do Moxotó. Em média, entre as sub-bacias, mais de 60% da água é perdida por evapotranspiração. Comparando as mesorregiões em que as sub-bacias dos reservatórios do Eixo Leste estão inseridas, há similaridade em relação ao padrão de precipitação entre o Sertão Pernambucano e o Sertão do São Francisco. Silva *et al.* (2022) avaliam que ambas as regiões possuem um padrão de precipitação "fortemente sazonal", sugerindo estações chuvosas e secas bem definidas. Essa sazonalidade está relacionada ao deslocamento das zonas de convergência de umidade ao longo do ano. Ainda, os autores identificaram um aumento nas anomalias negativas de precipitação na última década (2010-2020) para a mesorregião do Sertão do São Francisco, o que pode indicar mudanças nos padrões de convergência de umidade. Cabe citar que, apesar das complexas interações entre os recursos hídricos e a variabilidade climática local, o Rio São Francisco exerce influência sobre os padrões de precipitação em Pernambuco, especialmente na região ocidental. Essa relação pode ser observada na resposta do balanço hídrico (Figura 10), onde há um incremento na precipitação nas sub-bacias dos reservatórios de Muquém (sub-bacia 66), Cacimba Nova e Bagres (sub-bacia 67) e do Salgueiro (sub-bacia 77) em relação aos valores de precipitação para as sub-bacias do Moxotó.

Embora o Rio São Francisco exerça influência sobre os padrões climáticos na região, a variabilidade observada também está relacionada a uma combinação de fatores complexos. A alta variabilidade espacial e temporal da precipitação é uma das principais razões para o déficit hídrico acentuado que se percebe entre as sub-bacias. As séries históricas de precipitação (Figura 11) indicam uma perceptível sazonalidade entre períodos chuvosos e de estiagem, com picos que variam ao longo da série que estão relacionados a ação dos sistemas meteorológicos de grande escala, que a depender das condições atmosféricas atingem a região em menor ou maior grau. Silva e Guedes (2012), destacam que os principais sistemas que influenciam a situação de seca e disponibilidade hídrica no estado de Pernambuco são a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), os Sistemas Frontais, os Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOL) e, os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN), em períodos de menor ação ou ausência de tais fenômenos tendem a diminuir as precipitações. Na escala intranual a anomalia de temperatura da superfície do mar no Atlântico Tropical e eventos como *El nino* e *La ninha* afetam o regime de precipitação, e, conseqüentemente, as demais variáveis do balanço hídrico como a evapotranspiração e os fluxos de escoamento.

Figura 11: Médias mensais históricas de precipitação nas Sub-bacias para o cenário de Referência de 1966 a 2024



Fonte: Autora (2025)

As séries históricas de precipitação média mensal para as sub-bacias revelam padrões distintos ao longo da série temporal de 1961 a 2021. Em termos gerais, todas

as sub-bacias apresentam uma grande variabilidade mensal e interanual de precipitação, com algumas registrando eventos extremos mais marcantes do que outras. A ocorrência de secas é evidente em todas as séries, reforçando a vulnerabilidade hídrica da região. A Figura 11 mostra a distribuição irregular das chuvas, com eventos de maior intensidade concentrados em determinados períodos e picos acentuados de precipitação ao longo da série histórica. A variação sazonal é evidente, refletindo os períodos de estiagem e chuvas intensas características do semiárido. A Sub-bacia do reservatório Barreiro (sub-bacia 2) e a dos reservatórios Moxotó, Campos e Barro Branco (sub-bacia 3) apresentam um comportamento similar, porém a última com uma menor frequência de eventos extremos, com valores médios que se concentram até 4 mm.

Na Sub-bacia do reservatório Copiti (sub-bacia 11), do Bagres (sub-bacia 19), do Muquém (sub-bacia 66) e dos reservatórios Cacimba Nova e Bagres (sub-bacia 67), embora os períodos de seca sejam notáveis e a sazonalidade da precipitação seja uma característica marcante típica do clima semiárido, observa-se um leve aumento nas médias pluviométricas nos anos mais recentes. Os resultados exigem uma investigação mais aprofundada por meio de estudos climáticos específicos para a região, visando compreender as possíveis causas das alterações na série histórica de dados.

No modelo SWAT, os dados de precipitação utilizados na simulação hidrológica são geralmente obtidos a partir de estações meteorológicas, sendo espacialmente interpolados para representar a distribuição da chuva nas sub-bacias. Entretanto, a resolução e a qualidade dessas informações influenciam diretamente a acurácia da modelagem. Fatores como a densidade da rede pluviométrica, a interpolação espacial dos dados e as incertezas associadas à medição impactam a forma como a precipitação é representada no modelo (Omani *et al.*, 2017; Amorim *et al.*, 2020). Além disso, eventuais discrepâncias entre os valores observados e simulados podem decorrer da parametrização do modelo, que pode não capturar adequadamente variações locais influenciadas pela topografia e pelos padrões climáticos regionais (Yaduvanshi *et al.*, 2017; Amorim *et al.*, 2020). Dessa forma, é essencial uma investigação adicional para avaliar se o aumento identificado nas médias pluviométricas reflete uma tendência climática real ou se pode estar associado a incertezas na modelagem e nos dados utilizados. Considerando que previsões climáticas para o semiárido brasileiro apontam para um agravamento do déficit hídrico,

com aumento da frequência de eventos extremos, elevação das temperaturas e redução da precipitação. Além disso, há uma tendência projetada para períodos mais prolongados de dias secos consecutivos, conforme destacado por Marengo, Torres e Alves (2017).

A Sub-bacia do reservatório Salgueiro (sub-bacia 77) destaca-se em relação às demais, sendo a de maior extensão territorial e a localizada mais a sudoeste da AID. A precipitação na região apresenta uma distribuição mais equilibrada, com menor frequência de eventos extremos. Destaca-se a década de 1990, como um período em que as precipitações médias mensais não ultrapassaram 2 mm na maior parte do tempo. Esse padrão sugere uma influência direta da climatologia regional na dinâmica hídrica da sub-bacia, que apresenta uma menor incidência de eventos de seca extrema ao longo da série histórica. No entanto, observa-se a ocorrência de períodos de seca mais concentrados, como a estiagem prolongada da década de 1990, que impactou fortemente a precipitação na região.

No contexto agrícola, a baixa disponibilidade hídrica impacta diretamente as culturas que dependem da oferta de chuvas, tanto em termos de frequência quanto de intensidade. Lopes; Dantes e Ferreira. (2020), em sua análise sobre o cultivo do milho, uma das culturas de maior relevância econômica no semiárido, destacam que o milho é considerado uma cultura de alta demanda hídrica. No entanto, devido à elevada variabilidade climática da precipitação, os agricultores enfrentam dificuldades para explorar plenamente o potencial produtivo da cultura, resultando em baixos rendimentos de grãos.

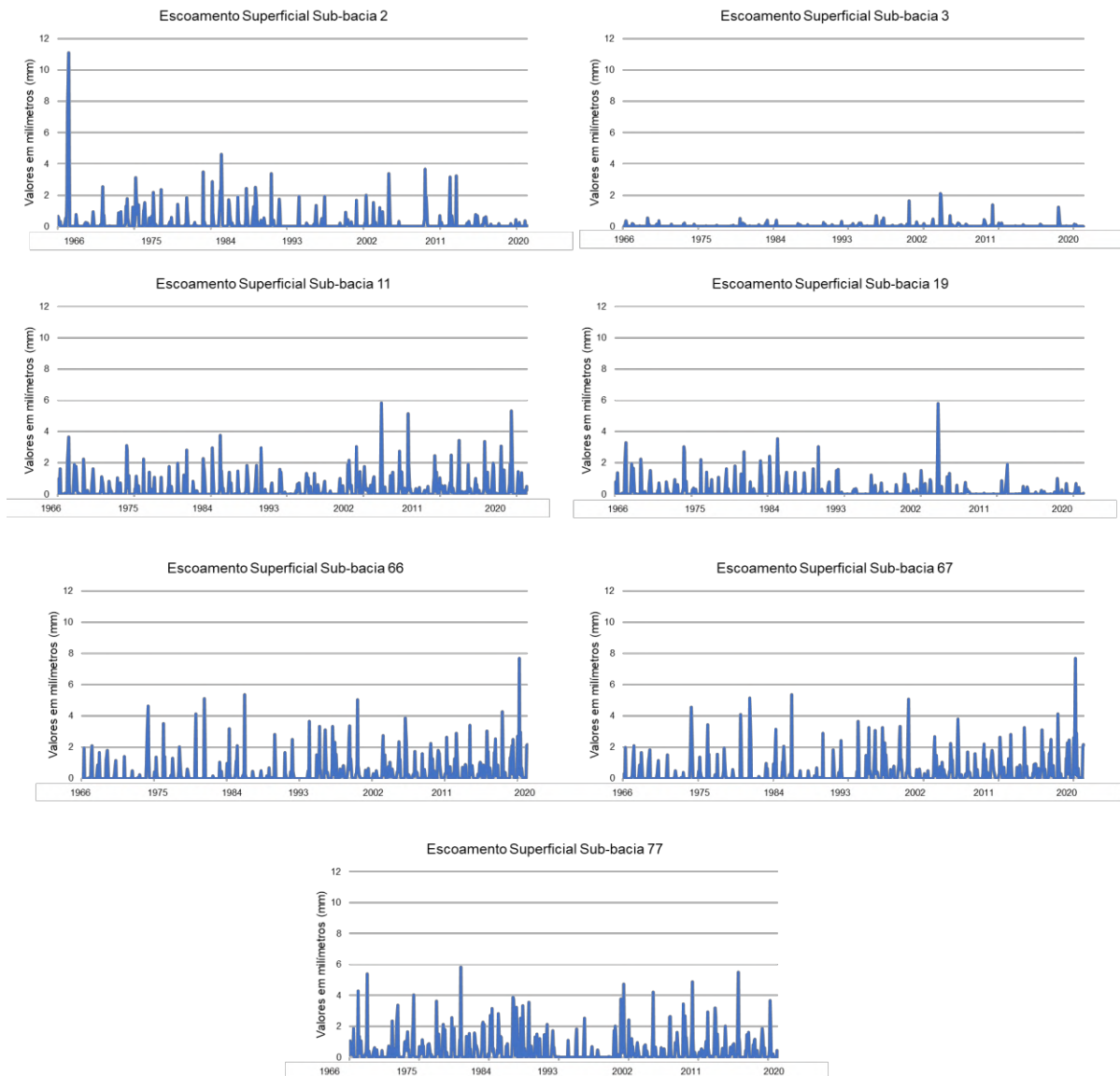
As características de escoamento e os demais processos hidrológicos também estão sobre influência do regime e do volume pluviométrico. A precipitação é a principal fonte de entrada de água para o escoamento superficial e determina, em grande parte, a quantidade de água disponível para esse processo (Miranda *et al*, 2017). Os resultados apresentados por Galvêncio e Luz (2021) demonstram que o regime de precipitação influencia, diretamente, o escoamento superficial nas bacias hidrográficas. As autoras analisaram o impacto do aumento de CO₂ nas precipitações em Pernambuco ao comparar os balanços hídricos anuais de duas bacias hidrográficas, com características climáticas distintas: a do Rio Pontal, representando o semiárido, e a do Rio Goiana, localizado na região de transição entre o agreste e o litoral. Os resultados indicam que, na bacia semiárida, onde a precipitação média anual é de 497,2 mm, o escoamento superficial corresponde a 13,67% dos fluxos

superficiais. Na bacia do Rio Goiana, com uma precipitação média de 1.164 mm, esse valor sobe para 22%, evidenciando a influência do regime pluviométrico na geração de escoamento. No entanto, o volume de chuva nem sempre resulta em um impacto direto na resposta do escoamento, uma vez que fatores como o tipo de solo, a cobertura vegetal e a evapotranspiração também influenciam a disponibilidade de água para os fluxos superficiais, ressaltando a complexa interação entre variáveis climáticas e os componentes físicos do ciclo da água em uma bacia (Lopes *et al.*, 2021).

Observa-se entre as sub-bacias em que estão localizados os reservatórios do eixo Leste do PISF que os fluxos superficiais representam uma pequena fração em relação à água que entra no sistema, variando de 5% na sub-bacia do reservatório Moxotó, Campo e Barro Branco - que apresenta a menor razão entre as sub-bacias - até, aproximadamente, 20% nas demais sub-bacias. O escoamento superficial (SURQ) é um componente essencial do ciclo hidrológico e uma fonte crucial de abastecimento para reservatórios e açudes, e desempenham um papel fundamental no fornecimento de água durante os períodos secos. Ao analisar as séries históricas de escoamento superficial, apresentadas na Figura 12, observa-se uma forte correlação com os padrões de precipitação registrados.

O escoamento superficial entre as sub-bacias é baixo ao longo de toda a série de dados e possuem relação direta com os padrões de precipitação (Figura 12). Percebe-se que a sazonalidade e as interferências climáticas afetam o volume de água que escoar no solo. Na Sub-bacia do reservatório Barreiro (sub-bacia 2), verifica-se que os picos de escoamento coincidem com os períodos de maior precipitação, indicando uma resposta hidrológica rápida aos eventos de chuva intensa, com destaque para o pico de escoamento de 11 mm na década de 1960 que está relacionado a um pico de precipitação na série de dados; o evento pontual tem apenas expressividade na sub-bacia e pode estar relacionado a eventos climáticos locais.

Figura 12: Médias mensais históricas de escoamento superficial nas Sub-bacias para o cenário de Referência de 1966 a 2024 Médias mensais históricas de escoamento superficial nas Sub-bacias para o cenário de Referência de 1966 a 2024



Fonte: Autora (2025)

A sub-bacia dos reservatórios Moxotó, Campos e Barro Branco (sub-bacia 3) apresenta um escoamento relativamente baixo na maior parte do tempo, não ultrapassando 2 mm ao longo de toda a série, o que reflete a menor intensidade das chuvas registradas. Esse comportamento também está relacionado ao elevado fluxo de base observado na sub-bacia, em comparação aos fluxos superficiais, destacando que o fator responsável pela geração do escoamento está diretamente associado às propriedades físicas da área. Mwakalila, Feyen e Wyseure (2002) destacam que o escoamento de base em regiões semiáridas é fortemente influenciado pelas variações temporais e espaciais da precipitação. Além disso, ressaltam que fatores como

topografia, geologia, características do solo e condições climáticas desempenham um papel significativo na sua dinâmica. A relação entre essas propriedades e o escoamento de base permite avaliar como a bacia hidrográfica responde às variações ambientais, evidenciando a complexidade dos processos hidrológicos nessas regiões.

As sub-bacias do reservatório Copiti (sub-bacia 11), do Muquém (sub-bacia 66) e dos reservatórios Cacimba Nova e Bagres (sub-bacia 67), se assemelham novamente em relação a resposta hidrológica, nas sub-bacias, os picos de escoamento são mais evidentes e apresentam uma distribuição temporal consistente, correlacionando-se com os períodos de maior precipitação. Nos períodos mais recentes, observa-se um leve aumento no escoamento, o que acompanha a tendência registrada nos dados de precipitação. Essa característica reforça a influência das precipitações na dinâmica hídrica da região. A sub-bacia do reservatório Bagres (sub-bacia 19), segue um padrão semelhante, com picos de escoamento coincidentes com os eventos de maior precipitação. A intensidade dos escoamentos, no entanto, é relativamente menor em comparação com outras sub-bacias. A partir de 2010, observa-se uma queda mais expressiva, o que também está correlacionado com a série de precipitação, que apresenta uma ligeira redução no mesmo período. Por fim, a sub-bacia do reservatório Salgueiro (sub-bacia 77) exibe um padrão de escoamento que reflete diretamente os picos de precipitação. A intensidade do escoamento sugere que há uma significativa fração da precipitação contribuindo diretamente para o fluxo superficial, o que pode impactar a disponibilidade de água na região.

Comparando as sub-bacias dos reservatórios inseridos nas bacias do Moxotó e do Pajeú, observa-se que as últimas são mais favorecidas em termos de precipitação e de recarga de aquíferos, o que pode indicar uma maior resiliência hídrica, especialmente em cenários de mudanças climáticas. As sub-bacias do Moxotó, com menor precipitação e recarga, podem ser mais vulneráveis à redução da disponibilidade hídrica em períodos de seca, o que afetaria diretamente a agricultura.

Diante da vulnerabilidade hídrica que a região, como um todo enfrenta, especialmente nas sub-bacias do Moxotó, políticas e investimentos em infraestrutura tornam-se fundamentais para garantir a segurança hídrica e o desenvolvimento sustentável da região. Castro (2018), em seu estudo sobre as políticas de enfrentamento à seca e desenvolvimento da irrigação no semiárido brasileiro, aponta que consideráveis investimentos em infraestrutura hídrica foram realizados nas últimas décadas na região semiárida brasileira, com o intuito de promover a agricultura

de alto rendimento econômico e mitigar as limitações impostas à agricultura regional. O PISF é um importante exemplo de infraestrutura hídrica, que busca garantir o abastecimento de água para diversos usos, visando a segurança hídrica no semiárido, torna-se um importante objeto para o desenvolvimento de pesquisas sobre gestão sustentável e adaptativa da água. Isto é, por englobar o seu território de influência comunidades e grupos vulneráveis socioambientalmente que demandam de água para desenvolvimento das necessidades humanas e atividades agrícolas (Silva *et al.*, 2015).

Cabe destacar que a população da AID é composta, majoritariamente, por pequenos agricultores e comunidades rurais que dependem da agricultura para sua subsistência. O desenvolvimento econômico da região está intimamente ligado à disponibilidade de água e à eficiência do uso dos recursos hídricos. Nesse contexto, a transposição do Rio São Francisco apresenta um potencial transformador, capaz de alterar a dinâmica socioeconômica local ao proporcionar novas oportunidades para o desenvolvimento agrícola e melhorar as condições de vida das populações rurais. Dado que a escassez hídrica no semiárido constitui um dos principais entraves ao desenvolvimento regional (Fechine; Galvínio, 2014), a transposição pode representar uma solução significativa para superar essa limitação (MI, 2005).

4.1.1 Cenário de mudanças climáticas para o balanço hídrico

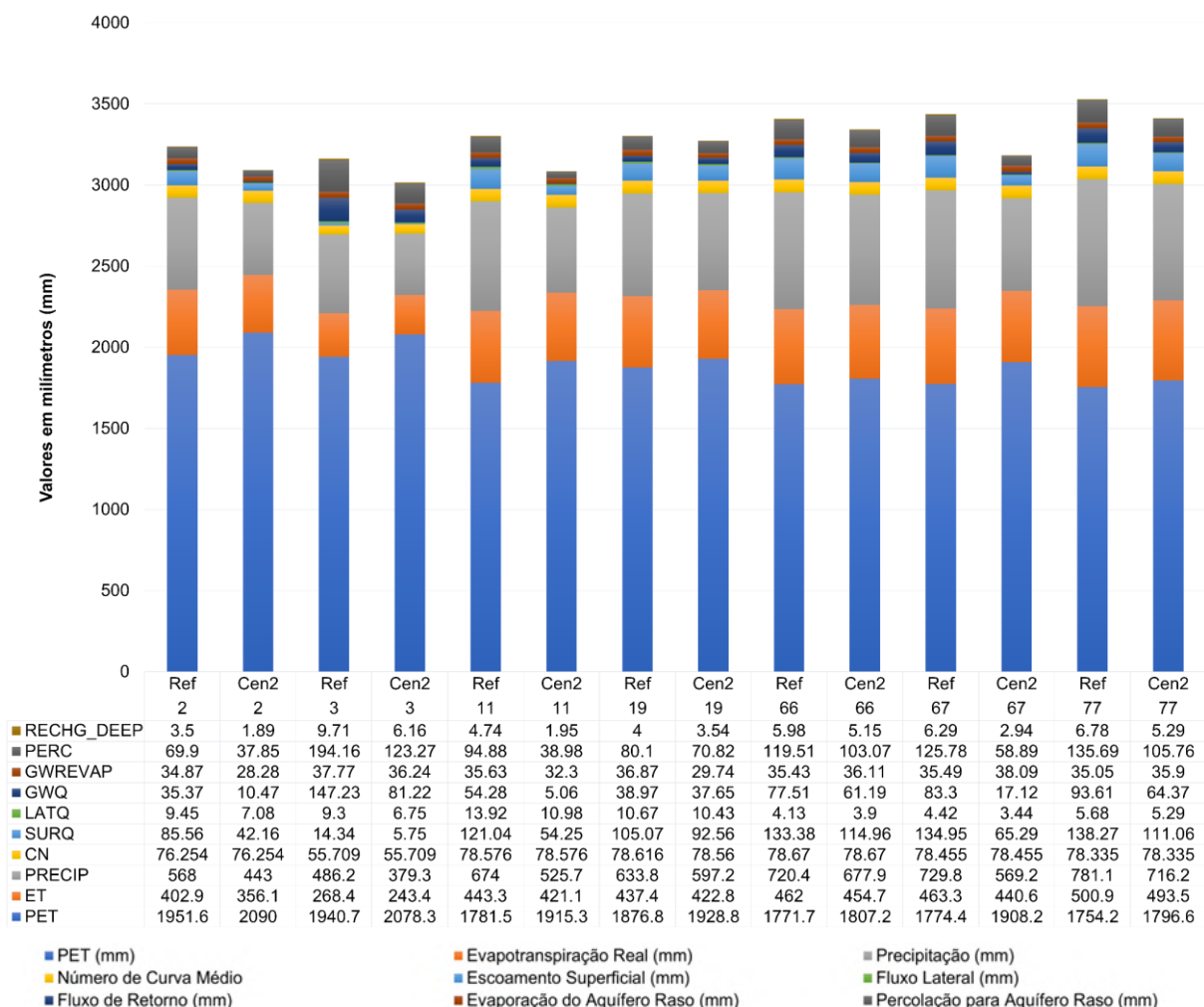
As mudanças climáticas têm um efeito direto na disponibilidade hídrica, especialmente em regiões semiáridas como o Nordeste brasileiro. A intensificação dos eventos climáticos extremos, como secas mais frequentes e prolongadas, altera o regime de precipitação e temperatura, resultando em uma maior variabilidade na disponibilidade de água. Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2023), as previsões indicam uma redução significativa das chuvas e uma maior evapotranspiração, o que pode agravar a escassez hídrica na região. Esses impactos desafiam ainda mais a capacidade de gestão dos recursos hídricos, aumentando a competição entre os diferentes setores e comprometendo a segurança hídrica e alimentar.

A agricultura no semiárido brasileiro enfrenta inúmeros desafios devido à baixa disponibilidade hídrica e à irregularidade das chuvas (Ferreira *et al.*, 2017). Com as mudanças climáticas, esses desafios tendem a se intensificar, colocando em risco a viabilidade da agricultura de sequeiro, que depende, diretamente, das precipitações

para garantir a produção. Além disso, a maior frequência de eventos climáticos extremos, como ondas de calor e chuvas intensas, pode comprometer a produtividade agrícola e aumentar as perdas econômicas (Marengo *et al.*, 2019).

Os resultados comparativos entre os cenários simulados indicam que, para todas as sub-bacias, houve aumento do déficit hídrico no cenário de incremento de 2,5°C de temperatura e redução de 22% da precipitação em comparação com o cenário de referência sem modificações dos dados de entrada (Figura 13). Percebe-se que a evapotranspiração continua sendo uma das grandes fontes de perda de água nas sub-bacias em que estão inseridos os reservatórios do eixo Leste do PISF. A evapotranspiração constitui uma das principais vias de perda de água em bacias hidrográficas, sendo particularmente acentuada nas regiões semiáridas em função de suas características climáticas, como elevadas temperaturas, baixa umidade relativa e índices de precipitação irregulares. No contexto do semiárido brasileiro, esses fatores intensificam o processo de evapotranspiração, resultando em desafios adicionais para a gestão dos recursos hídricos. Conforme destacado por Silva *et al.* (2023), projeções futuras indicam um aumento significativo da evapotranspiração na região, o que poderá acarretar consequências graves, como a redução da biodiversidade e a intensificação de conflitos sociais relacionados à escassez de água.

Figura 13: Balanço Hídrico Simulado nas Sub-bacias: Comparação entre o Cenário Atual e o Cenário com +2,5 °C e -22% de Precipitação



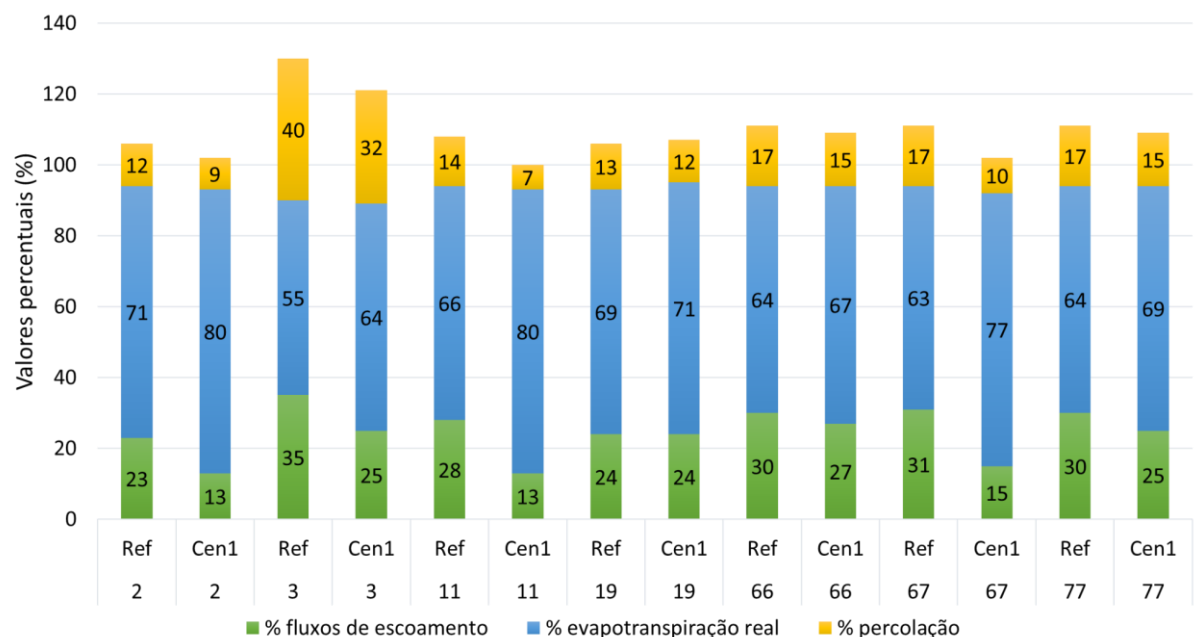
Fonte: Autora (2025).

A comparação dos valores absolutos das variáveis do balanço hídrico médio mensal para as sub-bacias (Figura 13) revela que, além da evapotranspiração, há uma redução generalizada na recarga profunda, na percolação para o aquífero raso, no fluxo de retorno, no escoamento superficial e na precipitação nos cenários projetados. Essa diminuição indica uma menor disponibilidade hídrica tanto para os corpos de água quanto para os aquíferos, comprometendo o armazenamento e a dinâmica do ciclo hidrológico. De modo geral, os resultados apontam para um agravamento da vulnerabilidade hídrica das sub-bacias, o que pode impactar significativamente a disponibilidade de água para múltiplos usos, especialmente para a agricultura, que depende tanto dos recursos hídricos superficiais, quanto dos subterrâneos.

Tiburcio *et al.* (2023), ao avaliarem nove cenários de balanço hídrico para a sub-bacia hidrográfica do Riacho Amolar, localizada no semiárido pernambucano, considerando um aumento de temperatura de até 4°C até o final do século XXI, observaram que há uma relação direta entre o aumento da temperatura e a evapotranspiração nos cenários de mudanças climáticas. Em cenários onde a temperatura aumenta, mesmo sem grandes variações na precipitação, a evapotranspiração tende a crescer. Nos cenários mais críticos, com um aumento de 4°C na temperatura e uma redução de 20% na precipitação, a perda de água por evapotranspiração é significativamente maior, o que impacta negativamente o balanço hídrico. Além disso, os autores destacam que há uma redução consistente na percolação e no fluxo de base, especialmente nos cenários com menores índices de precipitação, resultando em menor disponibilidade hídrica para a região. O estudo destaca que, embora a temperatura não afete igualmente todos os componentes do balanço hídrico, qualquer redução na precipitação tem um impacto abrangente no sistema, agravando a escassez de água, especialmente no semiárido.

A partir da Figura 14 é possível avaliar que a maior perda de água entre as sub-bacias é pela evapotranspiração, condição típica para áreas semiáridas, porém que tende a ser acentuada em cenários de aumento da temperatura.

Figura 14: Comparação percentual entre fluxos de escoamento, evapotranspiração e percolação nas sub-bacias



Fonte: Autora (2025).

A partir da análise da Figura 14, os dados apresentados indicam que no cenário de referência (Ref), observa-se que a evapotranspiração domina o balanço hídrico em todas as sub-bacias, variando entre 55% e 71%, com destaque para a sub-bacia 2, que apresenta a maior taxa de evapotranspiração (71%). O escoamento, que engloba os fluxos superficiais e laterais, varia entre 20% e 5%. A percolação, por sua vez, se mantém relativamente baixa, com valores entre 12% e 17%, indicando uma modesta infiltração de água no solo, destaca-se apenas a sub-bacia dos reservatórios Moxotó, Campo e Barro Branco (sub-bacia 3), que apresenta 40% de percolação se diferenciando em relação às demais sub-bacias.

A sub-bacia dos reservatórios Moxotó, Campo e Barro Branco (sub-bacia 3) se destaca por englobar três reservatórios do eixo Leste em seus limites e por apresentar uma percolação superior em comparação com as demais sub-bacias, tanto no cenário de referência quanto no de mudanças climáticas. A região, é predominantemente composta por solos Neossolos Litólicos de textura arenosa e média, associados às classes de uso CRWO e SPAS, que recobrem, respectivamente, 53% e 47% da área. Apesar da tendência observada de alta percolação, os Neossolos Litólicos possuem baixa permeabilidade e percolação devido ao perfil raso sobre rocha e aos horizontes pouco desenvolvidos Leite (2022). Observa-se, com base no balanço hídrico médio mensal atual (Figura 10), que, embora a percolação seja elevada devido às características texturais dos Neossolos, o fluxo de retorno na sub-bacia é elevado, correspondendo a 147 mm no cenário de referência, o que representa que 76% da água que percola retorna à superfície. Também se considera que parte da água que percola ascende capilarmente e é perdida a partir da evaporação do solo e das raízes das plantas, e apenas uma pequena parte da água percolada chega ao aquífero profundo.

Luz e Galvínio (2022) obtiveram resultados semelhantes para a bacia hidrográfica do riacho Milagres, cujas características são comparáveis a sub-bacia dos reservatórios Moxotó, Campo e Barro Branco, que apresenta alta percolação e um fluxo de retorno expressivo. Na bacia do riacho Milagres, 56% da precipitação total é percolada, e desse volume, 283 mm retornam à superfície, correspondendo a uma razão de 37% do fluxo de retorno. Em termos hidrológicos, essa configuração pode resultar em um sistema com respostas rápidas à chuva: pouca retenção superficial, menor tempo de concentração e maior variabilidade no escoamento. Em períodos secos, a disponibilidade de água superficial pode depender muito da recarga

subterrânea e da conectividade entre o aquífero e os rios. Em contrapartida, em eventos de chuva intensa, pode haver rápida saturação do solo, favorecendo processos erosivos, especialmente em áreas com baixa cobertura vegetal.

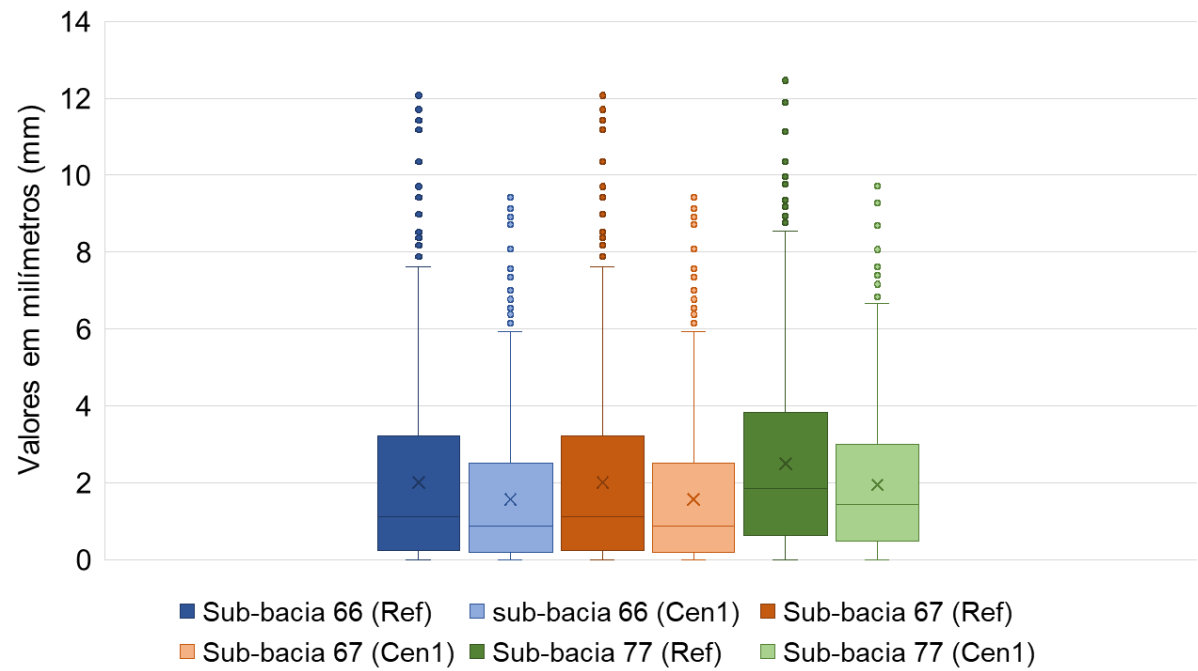
No cenário de mudanças climáticas (Cen1), há um aumento generalizado da evapotranspiração, alcançando até 80% nas sub-bacias do reservatório Barreiro (sub-bacia 2) e do reservatório do Copiti (sub-bacia 11), refletindo o impacto direto do aumento da temperatura e a redução da precipitação. O escoamento diminui significativamente, com valores variando entre 3% e 18%, destacando uma queda acentuada em comparação ao cenário de referência, com destaque para sub-bacia dos reservatórios Moxotó, Campo e Barro Branco (sub-bacia 3) que teve redução 5% para 3% no cenário de mudanças climáticas destacando as vulnerabilidades hídricas pronunciadas que as sub-bacias enfrentam. A percolação também apresenta uma redução expressiva, variando entre 7% e 32%, o que sugere menor recarga do solo e dos corpos d'água. Esse padrão de maior evapotranspiração e menor escoamento e percolação no cenário de mudanças climáticas evidencia um aumento do estresse hídrico, o que pode impactar negativamente a umidade do solo e a disponibilidade de água nas sub-bacias.

Observa-se ainda, a partir da Figura 14, que no cenário de mudanças climáticas, a percolação tende a diminuir em todas as sub-bacias, o que está relacionado ao aumento da evapotranspiração em consequência do aumento da temperatura na região. Projeções do IPCC (2022) indicam que as temperaturas máximas extremas anuais estão previstas para aumentar. A severidade das secas deverá aumentar devido à combinação de temperaturas mais elevadas, menor precipitação e uma redução da umidade relativa atmosférica entre 5% e 15%. A partir de 2041, prevê-se déficits hídricos de 3 a 4 mm/dia, especialmente no oeste do Nordeste e na região semiárida. Tais projeções apontam para o acirramento das dificuldades futuras em relação à segurança hídrica no semiárido. As previsões indicam ainda que as mudanças climáticas podem comprometer a produtividade agrícola, impactando culturas essenciais como feijão, milho, arroz e café, além de aumentar os riscos de insegurança alimentar e desnutrição (Mbow *et al.*, 2019). A agricultura de sequeiro, predominante na região, torna-se altamente vulnerável às variações climáticas, intensificando os desafios para a adaptação do setor. Além disso, o desmatamento e a expansão agrícola não planejada contribuem para a

degradação ambiental, reforçando a necessidade de estratégias de adaptação sustentáveis para garantir a segurança alimentar e hídrica no Nordeste brasileiro.

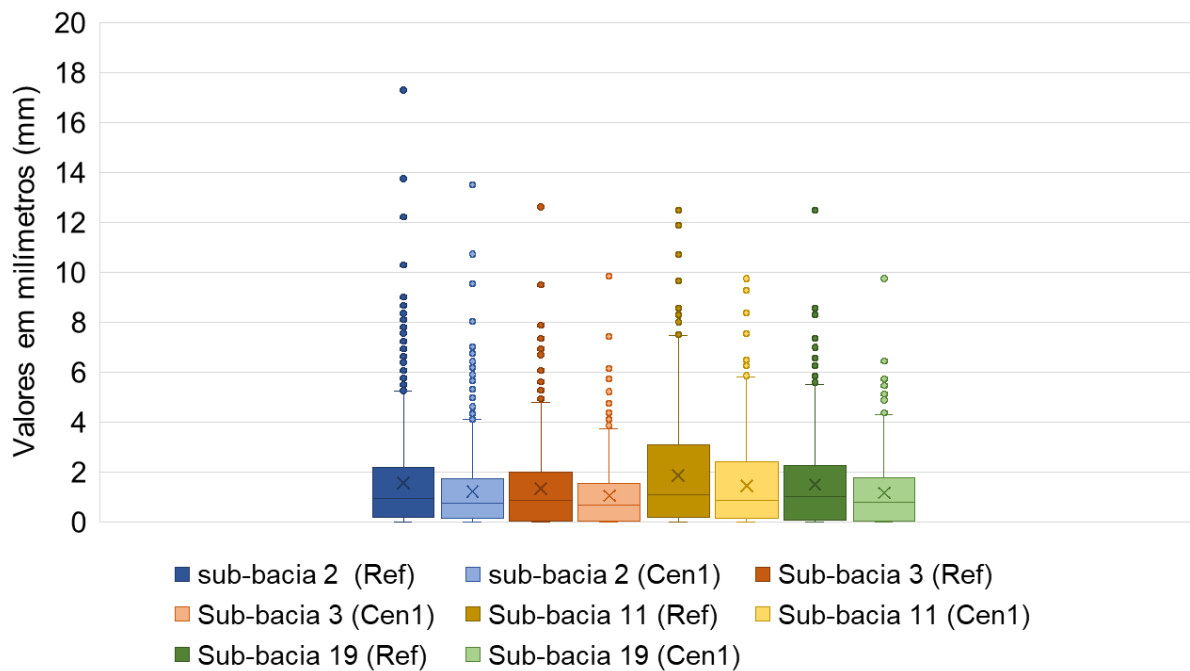
Ao comparar as séries históricas de precipitação para as sub-bacias do Eixo Leste, observa-se que essa variável, apontada por Tibúrcio *et al.* (2023), como a de maior impacto no ciclo hidrológico sob cenários de mudanças climáticas, percebe-se que incremento de 2,5°C de temperatura e redução de 22% na precipitação alteraram tanto o padrão médio quanto a variabilidade dos dados pluviométricos. Essa mudança é evidenciada nas Figuras 15 e 16, que ilustram a distribuição da precipitação por meio de boxplots para os cenários de referência e de mudanças climáticas nas bacias hidrográficas do Pajeú e Moxotó.

Figura 15: comparação da precipitação mensal para as sub-bacias da bacia hidrográfica do rio Pajeú nos Cenários de Referência e de Mudanças Climáticas



Fonte: Autora (2025).

Figura 16: comparação da precipitação mensal para as sub-bacias da bacia hidrográfica do rio Moxotó nos Cenários de Referência e de Mudanças Climáticas



Fonte: Autora (2025).

A análise dos boxplots (Figuras 15 e 16) revela uma redução na precipitação em todas as sub-bacias no cenário de mudanças climáticas, refletindo diretamente a diminuição de 22% no volume pluviométrico simulado. A mediana da precipitação apresenta queda em todas as sub-bacias, indicando que os meses mais chuvosos se tornam menos frequentes, o que afeta diretamente o armazenamento hídrico e a disponibilidade de água no semiárido. A redução na mediana é acompanhada por uma diminuição na amplitude interquartil, demonstrando que a variabilidade entre os meses se reduz. Esse comportamento sugere uma maior regularidade da seca, com menos eventos de precipitação elevada, agravando o déficit hídrico e comprometendo a recarga de aquíferos e reservatórios.

Além disso, a quantidade de outliers superiores, que representam eventos extremos de precipitação, é menor no cenário de mudanças climáticas para todas as sub-bacias, indicando uma redução na frequência de chuvas intensas, o que pode ser preocupante para a recarga hídrica do semiárido, uma vez que esses eventos costumam contribuir, fortemente, para o armazenamento de água. Ainda, a combinação de redução na precipitação com o aumento de 2,5°C na temperatura tende a intensificar a evapotranspiração, aumentando o déficit hídrico das sub-bacias, que deve impactar, negativamente, a disponibilidade de água para a agricultura,

reduzindo a produtividade das culturas e elevando a demanda por irrigação. Nesse contexto, os desafios enfrentados pela agricultura no semiárido brasileiro tornam-se ainda mais evidentes, como aponta Castro (2021), ao destacar as limitações estruturais que dificultam a adaptação dos agricultores às mudanças climáticas. O autor discute que as condições climáticas severas da região, que são historicamente desafiadoras para a produção agrícola, tornam os agricultores familiares particularmente vulneráveis ao agravamento das adversidades climáticas. Além disso, fatores como o baixo nível de escolaridade, o atraso tecnológico e a limitada inserção em práticas associativistas ou no acesso a serviços de assistência técnica intensificam essa vulnerabilidade. Esses desafios, combinados com dificuldades socioeconômicas e políticas, comprometem a capacidade adaptativa dos agricultores e de seus estabelecimentos agropecuários frente às mudanças climáticas.

Lamichhane *et al.* (2020) discutem o impacto das mudanças climáticas sobre a produção agrícola, especialmente a agricultura de pequena escala, destacando que mudanças no clima global têm afetado, de forma expressiva, a produção agrícola e a segurança alimentar, especialmente em regiões onde predominam pequenos produtores. O estudo indica que as respostas das culturas à variabilidade climática são diversas, mas predominantemente prejudiciais, resultando em impactos negativos na produtividade agrícola. Além disso, esses impactos variam espacialmente, com perturbações climáticas mostrando uma heterogeneidade pronunciada nos rendimentos das principais culturas de cereais. No caso da agricultura de pequenos produtores, eventos climáticos extremos, frequentemente causam danos localizados e significativos, exacerbando a vulnerabilidade dessas comunidades (Sass *et al.*, 2024).

Outro impacto esperado é a diminuição da recarga dos reservatórios e aquíferos, comprometendo a segurança hídrica da região. A redução dos volumes de escoamento nos rios, em consequência da diminuição da precipitação, deve afetar o abastecimento das comunidades locais e tornar as secas mais prolongadas e severas. Essas alterações no regime hídrico reforçam a necessidade de estratégias de adaptação, como o uso eficiente da água, armazenamento estratégico em reservatórios e adoção de práticas agrícolas mais resilientes à seca. A implementação dessas medidas pode mitigar os impactos das mudanças climáticas, garantindo uma maior segurança hídrica e sustentabilidade para as sub-bacias analisadas.

Neste contexto, Marques; Veras e Rodríguez (2022) enfatizam a importância das políticas hídricas para a gestão sustentável dos recursos hídricos, especialmente em cenários de mudanças climáticas. O aumento da demanda por água e os impactos de eventos extremos, como secas e inundações, evidenciam a importância de políticas públicas eficientes que integrem o planejamento de oferta e a demanda de água. O uso de cenários futuros e projeções climáticas, como os propostos pelo IPCC, é crucial para adaptar a gestão de recursos hídricos, minimizando vulnerabilidades e garantindo resiliência.

De acordo com o IPCC (2018), a limitação do aquecimento global a 1,5°C é crucial para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Essa limitação tornaria significativamente mais fácil alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) relacionados à erradicação da pobreza, ao acesso à água potável, à criação de cidades seguras, à segurança alimentar, à promoção da saúde e ao crescimento econômico inclusivo. Além disso, ajudaria a proteger os ecossistemas terrestres e a biodiversidade. Um caminho de baixas emissões aumentaria as chances de sucesso na consecução dos ODS voltados para a redução da pobreza e da fome, o fornecimento de energia limpa, a redução das desigualdades, a garantia de educação para todos e a promoção de cidades mais sustentáveis. No entanto, mesmo com a redução das emissões, há um risco médio de não alcançar plenamente as metas relacionadas à água e saneamento, bem como à proteção dos ecossistemas marinhos e terrestres.

4.1.2 Avaliação da umidade do solo

A agricultura de sequeiro desempenha um papel crucial no fornecimento de alimentos e na garantia dos meios de subsistência de grande parte da população mundial (Rockström *et al.*, 2010). Seu papel é vital na garantia de segurança alimentar e provê meios de subsistência para a população sertaneja. No Brasil, estima-se que 90% da área agrícola seja ocupada por cultivos de sequeiro, cujas culturas mais afetadas pelos riscos climáticos, identificadas pelo levantamento de Uso da Água na Agricultura de Sequeiro no Brasil (2013-2017), são o milho e a cana-de-açúcar (ANA, 2020). Nesse contexto, a análise da umidade do solo nas sub-bacias dos rios Moxotó e Pajeú, onde estão inseridos os reservatórios artificiais do Projeto de Integração do São Francisco (PISF), revela diferenças significativas nos níveis de retenção de água, tanto no cenário de referência, quanto no cenário de mudanças climáticas. Essas

variações são essenciais para compreender a resiliência hídrica de cada sub-bacia e para avaliar o impacto de mudanças nas condições climáticas, que afetam diretamente a capacidade de suporte agrícola e o planejamento de recursos hídricos na região.

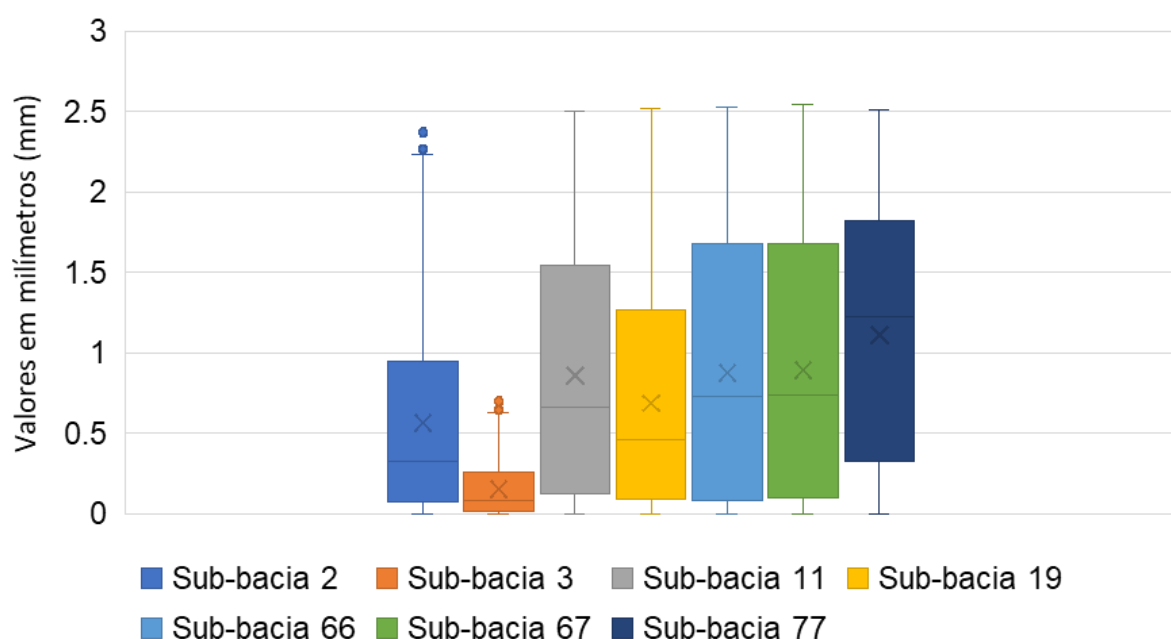
Além disso, a água é um recurso essencial para o crescimento e desenvolvimento das plantas. Durante o ciclo vegetativo e produtivo, as culturas demandam uma quantidade significativa de água para realizar processos fisiológicos como fotossíntese, transpiração e transporte de nutrientes (Cunha *et al.*, 2014). A falta de umidade adequada no solo pode levar à redução da produtividade, impactando, negativamente, a economia agrícola, especialmente em regiões dependentes da agricultura de sequeiro. Pandey; Putrevu e Misra (2021) destacam que, apesar de a umidade do solo representar apenas 0,05% da água no ciclo hidrológico global e 0,001% da água doce disponível, ela desempenha um papel fundamental no ciclo hidrológico. A umidade do solo influencia o clima global, o crescimento das plantas e o armazenamento de águas subterrâneas, sendo reconhecida como uma variável climática essencial devido à sua importância nas dinâmicas climáticas.

4.1.2.1 *Cenário de referência (Ref) da umidade do solo*

No cenário de referência (Ref) (Figura 17), percebe-se uma clara distinção entre as sub-bacias dos rios Moxotó e Pajeú em relação aos níveis de umidade do solo. As sub-bacias do Rio Moxotó (2, 3, 11 e 19) apresentam uma tendência a apresentar valores de umidade significativamente mais baixos. A sub-bacia dos reservatórios Moxotó, Campos e Barro Branco (sub-bacia 3), por exemplo, apresenta uma mediana muito próxima de zero, com valores concentrados em torno de 0,5 mm, indicando uma baixa capacidade de retenção de água no solo. Esse comportamento pode ser atribuído às características texturais do solo e à declividade do terreno, que influenciam diretamente a capacidade de retenção e armazenamento hídrico. Tais características se refletem nos resultados do balanço hídrico e nas variáveis associadas. A elevada percolação e a baixa retenção registradas nessa sub-bacia impactam, fortemente, a disponibilidade de água superficial, tornando os cursos d'água sazonais e reduzindo a recarga de aquíferos. Esse processo é particularmente preocupante em períodos de menor precipitação e secas prolongadas, uma vez que compromete a manutenção do nível dos reservatórios e dos cursos de água que compõem a região. As sub-bacias do reservatório Barreiro (sub-bacia 2) e do Bagres

(sub-bacia 19) possuem uma variabilidade maior, com medianas entre 0,5 mm e 1 mm, mas ainda assim apresentam baixos níveis de umidade do solo. A sub-bacia do reservatório Copiti (sub-bacia 11), por sua vez, exibe uma distribuição um pouco mais ampla, com uma mediana próxima a 1 mm e valores máximos de até 1,5 mm, o que pode sugerir uma ligeira vantagem em termos de retenção de umidade, em comparação com as demais sub-bacias em que estão alocados os reservatórios do PISF na bacia do rio Moxotó.

Figura 17: Distribuição da Umidade do Solo mensal nas Sub-bacias considerando o cenário de referência

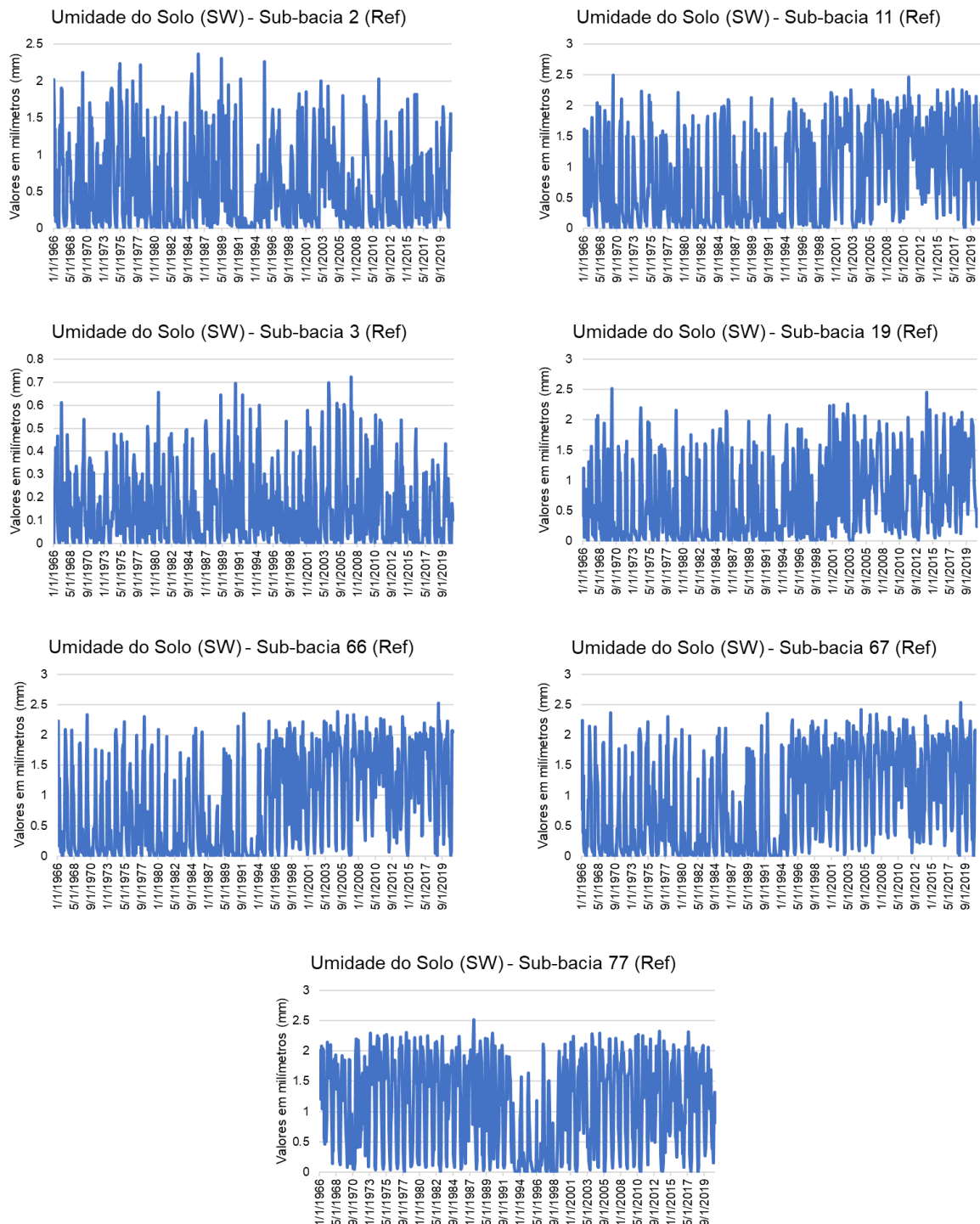


Fonte: Autora (2025)

Por outro lado, as sub-bacias do Rio Pajeú (66, 67 e 77) exibem maiores níveis de umidade do solo considerando o cenário de referência. A sub-bacia do reservatório Salgueiro (sub-bacia 77) é a que mais se destaca, com valores médios superiores a 1 mm e uma variabilidade bastante ampla. As sub-bacias dos reservatórios Cacimba Nova e Bagres (sub-bacia 67) e do Muquém (sub-bacia 66) também apresentam níveis de umidade consideráveis, com medianas acima de 1 mm, ou próximas a 1mm, e uma distribuição relativamente homogênea dos dados. Esse comportamento das sub-bacias do Pajeú sugere uma maior resiliência hídrica em comparação com as sub-bacias do Moxotó.

Na avaliação das séries históricas de umidade do solo para as sub-bacias no cenário de referência (Figura 18), verifica-se que as tendências de distribuição de dados identificadas pelo boxplot (Figura 17) são corroboradas por essa análise. De forma complementar, os gráficos das séries históricas oferecem uma visão mais detalhada das tendências gerais de umidade e da sazonalidade ao longo do tempo.

Figura 18: Médias mensais históricas de Umidade do Solo nas Sub-bacias para o cenário de Referência



Fonte: Autora (2025).

As sub-bacias do Rio Moxotó apresentam uma ampla variação na umidade do solo ao longo do tempo. A sub-bacia do reservatório Barreiro (sub-bacia 2) exibe picos consideráveis de umidade, indicando uma sensibilidade significativa às oscilações sazonais de precipitação. A sub-bacia dos reservatórios Moxotó, Campos e Barro Branco (sub-bacia 3) apresenta uma variação mais contida, com menores picos de umidade, sugerindo um comportamento mais estável. A sub-bacia do reservatório Copiti (sub-bacia 11) registra níveis de umidade mais elevados, com picos pronunciados, o que sugere uma capacidade maior de retenção de umidade de água no solo. Por sua vez, a sub-bacia do reservatório Bagres (sub-bacia 19) também apresenta picos acentuados de umidade, indicando uma alta exposição às variações naturais de precipitação.

Nas sub-bacias do Rio Pajeú, o comportamento é mais estável. A sub-bacia do reservatório Muquém (sub-bacia 66) mostra variações mais suaves, com poucos picos de umidade e uma estabilidade geral maior. A sub-bacia do reservatório Cacimba Nova e Bagres (sub-bacia 67) segue um padrão semelhante, com variações limitadas e um comportamento resistente às oscilações sazonais. A sub-bacia do reservatório Salgueiro (sub-bacia 77) apresenta uma variação ligeiramente maior em relação às outras sub-bacias do Pajeú, com picos ocasionais de umidade, mas sem grandes extremos, indicando que, embora sujeita a variações, ela mantém uma relativa estabilidade.

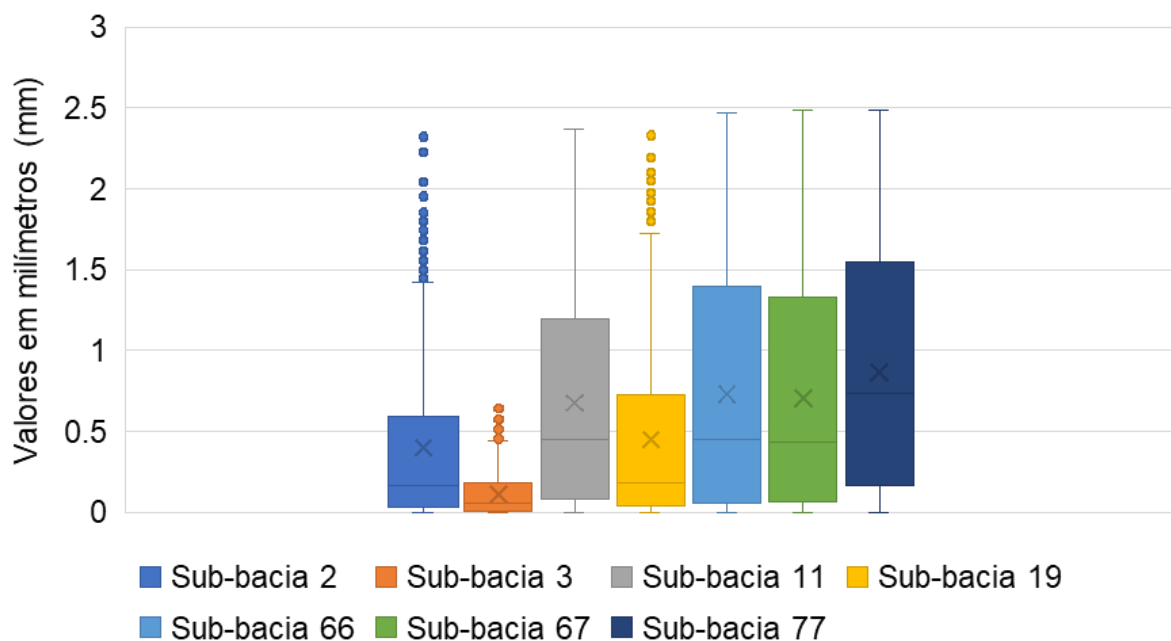
Chatterjee *et al.* (2022) destacam a umidade do solo como um componente essencial na identificação e na previsão de secas agrícolas. Enquanto a seca meteorológica é frequentemente associada a uma precipitação abaixo do normal, a seca agrícola é diretamente influenciada pela falta de umidade no solo necessária para sustentar o crescimento das culturas. A capacidade de medir e monitorar a umidade do solo é crucial para identificar secas agrícolas e prever seus impactos, oferecendo uma visão mais detalhada do déficit de água que afeta a produtividade agrícola, além de ajudar a distinguir entre diferentes tipos e intensidades de seca que podem não ser evidentes apenas com base em dados de precipitação.

4.1.2.2 Cenário de mudanças climáticas (Cen1) da umidade do solo

No cenário com mudanças climáticas (Cen1) (Figura 19), marcado por um aumento de 2,5°C na temperatura e uma redução de 22% na precipitação, os impactos nas sub-bacias são notáveis. As sub-bacias do Rio Moxotó mostram uma

redução significativa nos níveis de umidade do solo. A sub-bacia dos reservatórios Moxotó, Campos e Barro Branco (sub-bacia 3) continua apresentando valores extremamente baixos, com uma mediana praticamente inalterada, indicando uma vulnerabilidade severa às mudanças climáticas. A sub-bacia do reservatório Barreiro (sub-bacia 2), embora exiba maior variabilidade no cenário Cen1, tem seus valores de umidade ainda menores do que no cenário de referência, o que reflete um impacto negativo nas condições de retenção de água. As Sub-bacias dos reservatórios Copiti (sub-bacia 11) e do Bagres (sub-bacia 19) também mostram uma queda nos níveis de umidade, com a sub-bacia do reservatório Copiti (sub-bacia 11) apresentando uma redução considerável nos valores máximos e uma mediana mais baixa, evidenciando a crescente escassez de água no solo em função das mudanças climáticas, além de apresentar muitos *outliers* no cenário Cen1, que indicam maiores variações extremas.

Figura 19: Distribuição da Umidade do Solo nas Sub-bacias para o cenário de mudanças climáticas



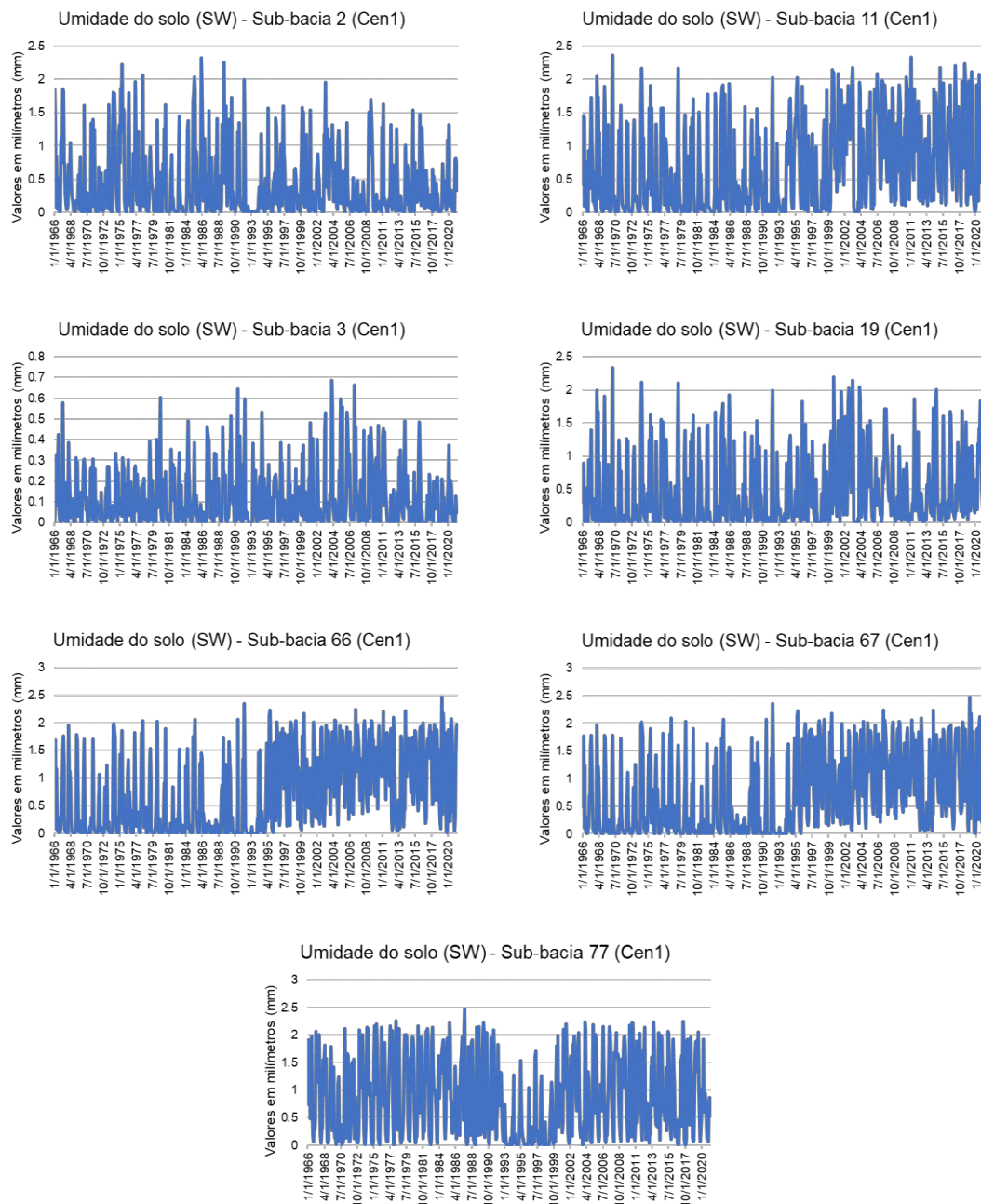
Fonte: Autora (2025)

Nas sub-bacias do Rio Pajeú, apesar de uma diminuição nos valores de umidade do solo, os impactos parecem ser menos acentuados do que nas sub-bacias do Moxotó. A sub-bacia do reservatório Muquém (sub-bacia 66) apresenta uma menor dispersão dos valores, com redução dos valores médios e da mediana. As sub-bacias dos reservatórios Cacimba Nova e Bagres (sub-bacia 67) e do Salgueiro (sub-bacia

77) mantêm valores de umidade razoavelmente consistentes, apesar de uma leve queda nas medianas.

Os resultados sugerem que as sub-bacias do Rio Moxotó são mais vulneráveis aos impactos das mudanças climáticas, enquanto as sub-bacias do Rio Pajeú demonstram uma maior capacidade de adaptação, isto pode ter implicações importantes para a gestão hídrica e o planejamento agrícola em um cenário futuro de mudanças climáticas na região.

Figura 20: Médias mensais históricas de Umidade do Solo nas Sub-bacias considerando o cenário de mudanças climáticas



Fonte: Autora (2025)

Assim como na análise dos gráficos das séries históricas de umidade do solo para as sub-bacias no cenário de referência, os gráficos referentes ao cenário de mudanças climáticas também corroboram a distribuição geral observada nos dados (Figura 19). A sub-bacia do reservatório Barreiro (sub-bacia 2) mostra uma redução significativa nos picos de umidade, o que indica que a menor precipitação, combinada com a maior evapotranspiração, está resultando em uma retenção muito menor de água no solo. Os reservatórios Moxotó, Campos e Barro Branco (sub-bacia 3) também apresenta uma redução acentuada nos picos de umidade, sugerindo que a diminuição de precipitação tem um impacto ainda mais negativo em uma sub-bacia que apresentava níveis mais baixos de umidade no cenário de referência. Na sub-bacia do reservatório Copiti (sub-bacia 11), os picos de umidade permanecem, mas em menor intensidade, sugerindo que o aumento de temperatura e a redução da precipitação estão afetando o potencial de retenção de água no solo. A sub-bacia do reservatório Bagres (sub-bacia 19) continua a apresentar variação significativa, mas com menores picos de umidade, em comparação ao cenário de referência, o que reflete o impacto direto da redução de precipitação.

Nas sub-bacias do Rio Pajeú, o efeito do Cen1 também é visível, entretanto mais moderado em comparação com as sub-bacias do Rio Moxotó. A sub-bacia do reservatório Muquém (sub-bacia 66) mantém uma relativa estabilidade, mas com uma ligeira redução na variação de umidade, sugerindo que, embora o aumento de temperatura e a diminuição da precipitação afetem a umidade do solo, o impacto não é tão drástico quanto nas sub-bacias do Moxotó. A sub-bacia dos reservatórios Camcima Nova e Bagres (sub-bacia 67) continua a apresentar pouca variação, com valores de umidade ligeiramente mais baixos, mas sem grandes oscilações. A sub-bacia do reservatório Salgueiro (sub-bacia 77) mostra uma leve redução nos picos de umidade em comparação ao cenário de referência, sugerindo que a redução da precipitação está começando a impactar mais essa sub-bacia.

Galvêncio, Miranda e Luz (2024) também realizaram simulações de cenários de mudanças climáticas para a bacia do rio Terra Nova, utilizando o SUPeR. O estudo na região semiárida de Pernambuco mostrou que a disponibilidade hídrica é limitada e pode se agravar com as mudanças climáticas. Com o aumento de 2°C na temperatura e a redução de 15% nas chuvas, projeta-se que a evapotranspiração potencial (PET) aumentará, enquanto o escoamento superficial, o fluxo lateral e o fluxo de retorno diminuirão. Esses fatores têm impacto direto na umidade do solo, que apresentou uma

tendência de redução ao longo do tempo, especialmente durante eventos extremos, como o El Niño de 1998, quando a umidade do solo chegou a níveis quase nulos até 2020. Assim como no estudo dos autores, é possível perceber uma queda nos níveis de umidade do solo durante a década de 1990 em vários dos gráficos de séries históricas para as sub-bacias analisadas, o que pode ser atribuído às variações climáticas dos períodos de seca mais intensa.

Han *et al.* (2023), considerando os componentes do balanço hídrico que afetam o teor de água no solo, destacam que as mudanças espaciais e temporais no armazenamento de água no solo são fortemente influenciadas pela variabilidade da precipitação, da evaporação e do escoamento superficial. A precipitação tem uma correlação positiva com a umidade do solo, enquanto a evaporação, que transfere água do solo para a atmosfera, também se relaciona diretamente com a umidade, especialmente nos 1-2 m superiores do perfil do solo.

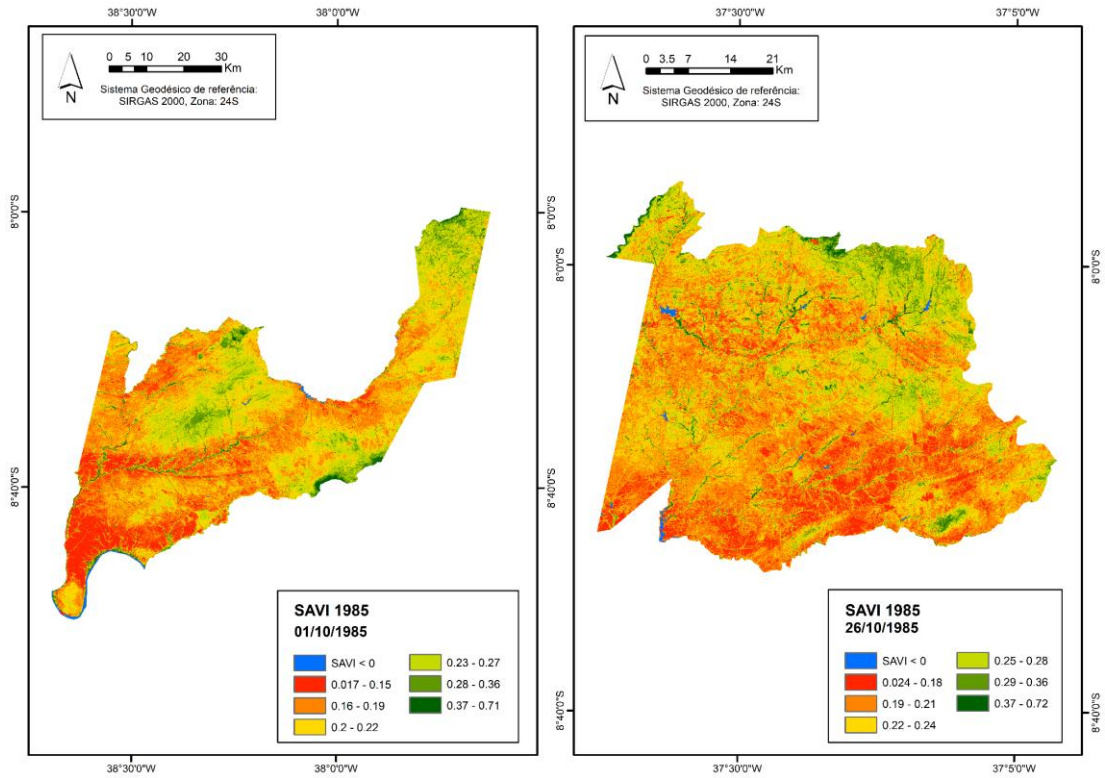
4.2 Avaliação espaço-temporal da resposta do balanço de energia e dos índices de vegetação

Nos últimos anos, tem-se observado que as mudanças nas condições climáticas estão afetando, tanto a produção agrícola quanto os recursos hídricos. Como resultado, uma estimativa precisa da evapotranspiração é necessária para o manejo adequado das culturas, análise das condições de seca e gerenciamento da água (Aryalekshmi *et al.*, 2021).

4.2.1 Mudanças na Cobertura vegetal

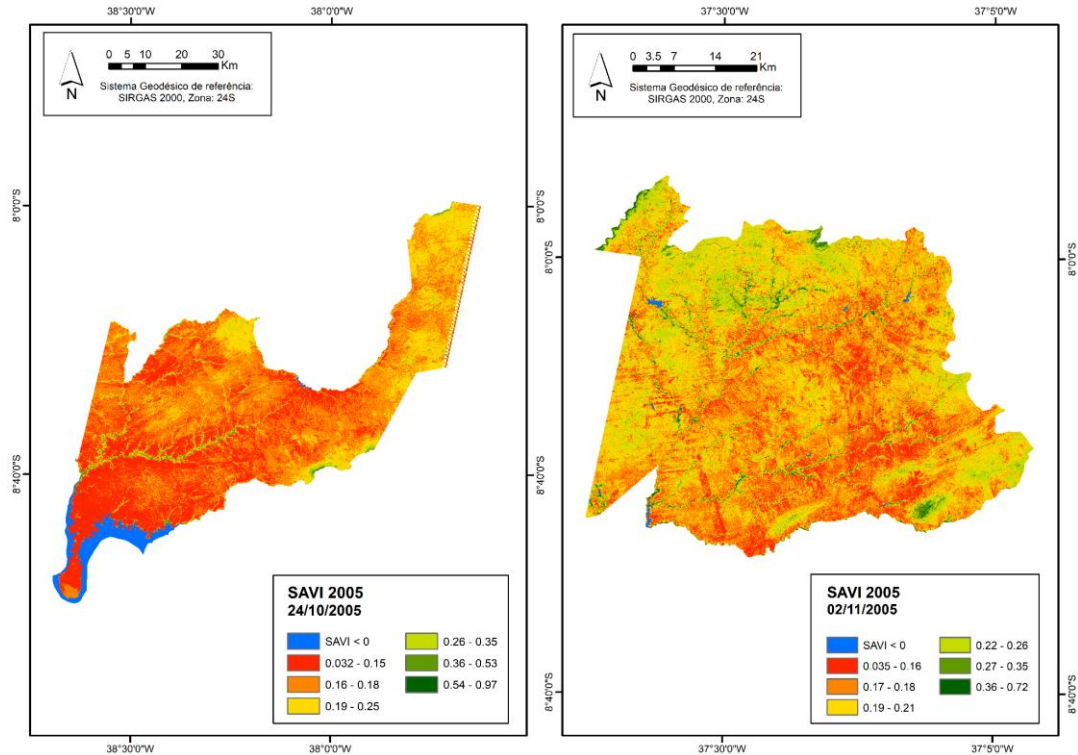
As Figuras 21-23 apresentam os resultados do Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI) para a AID nos anos de 1985, 2005 e 2023. É importante destacar que as imagens apresentadas correspondem ao recorte das cenas do satélite Landsat para cada data de aquisição, delimitadas conforme os limites da área de estudo. As cenas foram processadas individualmente, considerando as particularidades do processamento das imagens, especialmente dos componentes do balanço de energia.

Figura 21: Índice de Vegetação Ajustado do Solo nas cenas Landsat que abrangem a Área de Influência Direta do Projeto de Transposição do Rio São Francisco em 1985



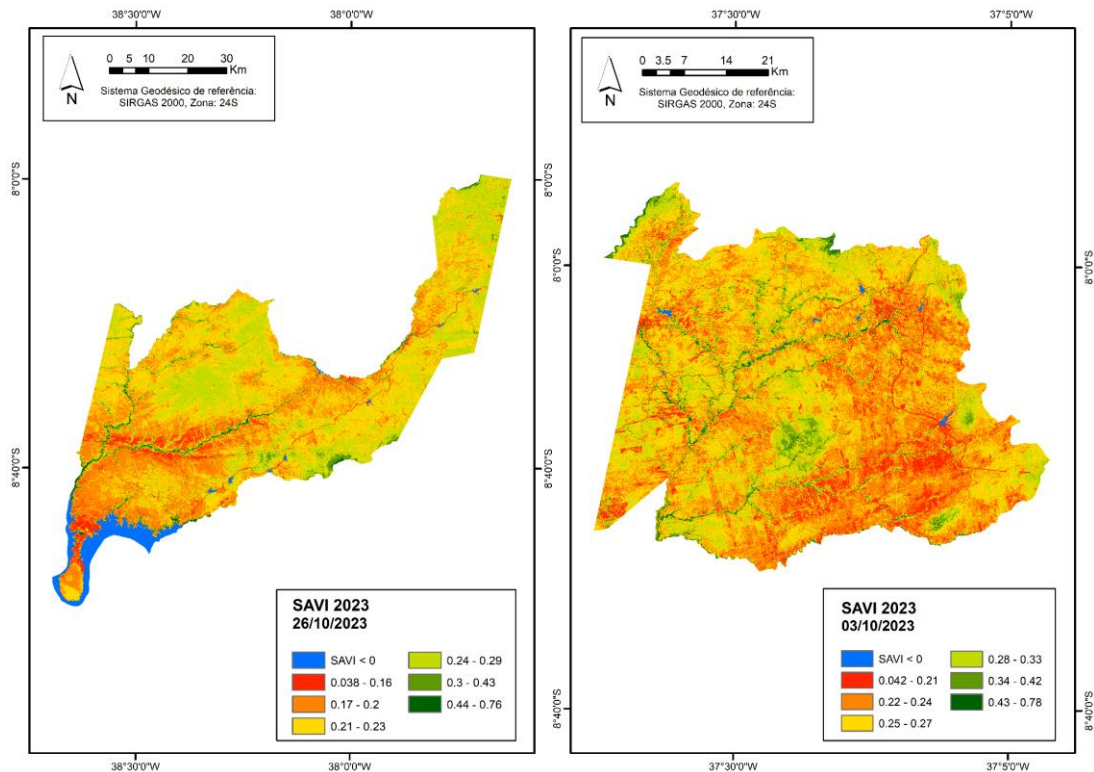
Fonte: Autora (2025)

Figura 22: Índice de Vegetação Ajustado do Solo nas cenas Landsat que abrangem a Área de Influência Direta do Projeto de Transposição do Rio São Francisco em 2005



Fonte: Autora (2025)

Figura 23: Índice de Vegetação Ajustado do Solo nas cenas Landsat que abrangem a Área de Influência Direta do Projeto de Transposição do Rio São Francisco em 2023



Fonte: Autora (2025)

A resposta espectral do SAVI está diretamente relacionada às características das bandas do vermelho (Red) e do infravermelho próximo (NIR). A estrutura celular da vegetação reflete de maneira mais intensa a radiação na faixa do NIR, que varia entre 0,7 e 1,1 μm . Sensores a bordo de satélites em órbita captam a reflectância nessas faixas espectrais, permitindo a classificação dos alvos na superfície com base em sua resposta espectral. Os valores obtidos possibilitam a distinção entre diferentes tipos de cobertura (Rouse *et al.*, 1974; Huete, 1988; Jensen, 2009). Embora o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) seja amplamente utilizado em estudos ambientais, o SAVI apresenta vantagens metodológicas por incorporar o fator de correção do solo, reduzindo a influência do brilho do solo e eliminando a necessidade de calibrações específicas para diferentes condições edafoclimáticas. Isto o torna particularmente adequado para regiões semiáridas, onde a vegetação esparsa e a elevada reflectância do solo podem comprometer a acurácia das estimativas de biomassa e vigor vegetativo. De acordo com Francisco *et al.* (2012), na distinção entre classes de vegetação no semiárido, utilizando NDVI, SAVI e EVI, salientam que o SAVI apresentou melhor correlação e melhor amplitude das leituras

de reflectância. Tais características conferem ao SAVI uma capacidade superior de interpretação espectral dos alvos vegetativos, possibilitando uma separação mais precisa das classes de biomassa vegetal. Dessa forma, este foi o índice de vegetação utilizado para avaliar a cobertura vegetal da AID.

Os valores mais baixos prevalecem no intervalo de até 0,2, sendo associados, estradas, edificações e solo exposto. Enquanto isso, os valores mais elevados, situados no intervalo de até 0,9, correspondem a áreas de maior altitude e áreas agrícolas, que se distribuem de forma localizada próximas aos cursos d'água e na proximidade de cursos de água e reservatórios ao longo da AID. Esses valores evidenciam mudanças significativas na vegetação, ao longo das últimas quatro décadas, refletindo tanto variações naturais quanto impactos antrópicos associados ao uso da terra e à disponibilidade hídrica na região semiárida.

Nascimento, Lima e Lima (2014), ao analisarem a cobertura vegetal no semiárido paraibano, estabeleceram uma classificação para diferentes tipos de vegetação com base nos valores do índice de vegetação (NDVI). Segundo os autores, valores entre 0,0 e 0,2 representam áreas de solo exposto. A vegetação arbustiva aberta está associada a valores entre 0,2 e 0,4, enquanto a vegetação arbustiva semiaberta varia de 0,4 a 0,6. A vegetação arbustivo-arbórea ocorre na faixa de 0,6 a 0,8, e valores entre 0,8 e 1,0 indicam áreas de vegetação arbóreo-arbustiva. Embora o SAVI inclua fator de correção para minimizar a influência do brilho do solo, há uma correlação geral entre os valores e intervalos para ambos os índices permitindo assumir similaridade entre a distribuição das classes.

Ao analisar a evolução da cobertura vegetal na área de estudo com base nos mapas de SAVI de 1985, 2005 e 2023 (Figuras 21-23), observa-se uma significativa mudança na distribuição das classes de solo exposto, vegetação arbustiva e vegetação com maior vigor vegetativo de porte arbustivo-arbóreo. Considerando todas as cenas percebe-se a predominância de valores até 0,2, que estão associados à presença de solo exposto. Em 1985, a classe era dominante em várias partes da região, e nota-se que entre 1985 e 2005 há um aumento espacial de solo exposto, às condições naturais de seca prolongada estão relacionadas ao aumento da resposta espectral ligada à classe de solo exposto. Considerando o histórico de secas no semiárido brasileiro, Marengo, Cunha e Alves (2016) apontam que as décadas de 1980, 1990 e o início dos anos 2000 foram marcados por eventos severos, resultando em expressivas perdas econômicas e na degradação da vegetação nativa. Os autores

destacam, em particular, a seca de 2012-2015, considerada a mais severa das últimas décadas.

Nas cenas de 2023, observou-se uma redução na área de solo exposto em comparação a 2005, embora essa classe de uso do solo ainda apresente significativa representatividade na região. Na porção sudoeste da AID, abrangendo majoritariamente o município de Floresta, destaca-se que a área está inserida no núcleo de desertificação de Cabrobó. Nesse contexto, a predominância de respostas do SAVI associadas ao solo exposto está diretamente relacionada às áreas do município que se encontram sob processo de desertificação. *Moraes et al.* (2011) analisaram a cobertura vegetal no município de Floresta nos anos de 1994 e 2007, identificando padrões semelhantes na área estudada. Os autores destacam que a maior incidência de solo exposto na porção sudoeste do município de Floresta está relacionada às características pedológicas locais, onde luvissolos rasos dificultam o estabelecimento de vegetação arbórea densa. Araújo Filho (2011) ressalta a importância das interações entre o solo e a paisagem no desenvolvimento da cobertura vegetal da Caatinga. Além disso, a irregularidade do regime de chuvas no semiárido, aliada a fatores como relevo e material de origem, contribui para a formação de um mosaico de solos distintos, entre os quais se destacam os pedregosos, frequentemente associados a afloramentos rochosos, predominantes na Depressão Sertaneja pernambucana.

A vegetação com maior vigor ($SAVI > 0,4$) apresentou um aumento significativo em 2023, em comparação a 1985 e 2005. Em 1985, essa classe estava restrita às áreas de maior altitude e proximidades de corpos de água naturais. Destaca-se que as regiões elevadas continuam exercendo um papel fundamental na elevação dos valores máximos de SAVI, abrangendo áreas de interesse ambiental, como reservas ecológicas e brejos de altitude.

A fitofisionomia da Caatinga em regiões de maior elevação caracteriza-se por uma vegetação mais densa e de porte arbóreo mais elevado, influenciada pela umidade local, o que resulta em uma resposta espectral diferenciada em relação às regiões de vegetação mais esparsa e rala, predominantes no semiárido. As regiões de maior altitude, associadas aos valores mais elevados de SAVI, são observadas, principalmente, ao norte nas imagens dos dias 26/10/1985, 02/11/2005 e 03/10/2023, bem como ao sul e ao nordeste nas datas de 01/10/1985, 24/10/2005 e 26/10/2023. Destaca-se que, mesmo no ano de 2005, quando os valores de SAVI apresentam

maior predominância até 0,2, os brejos de altitude permanecem como áreas de alta resposta espectral, evidenciando maior vigor vegetativo.

De acordo com Laurentino *et al.* (2011) os brejos de altitude no semiárido nordestino destacam-se como áreas úmidas isoladas em meio à Caatinga, caracterizando-se pela alta diversidade vegetal, incluindo espécies de Mata Atlântica, cerrado e caatinga hipoxerófila. Localizados principalmente no Maciço da Borborema, essas regiões influenciam o clima e a drenagem local, apresentando desníveis superiores a 200 m e condições mais úmidas em comparação ao entorno árido.

Considerando as cenas de 2023, observam-se alterações significativas na densidade vegetal, com uma ampliação notável dos valores máximos de SAVI, variando entre 0,43 e 0,78, evidenciando as distintas unidades de paisagem e o condicionamento da cobertura vegetal. A expansão das áreas irrigadas, em particular, merece destaque, apresentando maior expressão no ano de 2023. Essas áreas estão predominantemente localizadas nas proximidades de cursos d'água e reservatórios destinados à irrigação. Além disso, destaca-se que a ampliação da infraestrutura hídrica nas áreas beneficiadas pela transposição do Rio São Francisco exerce influência direta sobre o aumento dos valores máximos de SAVI na região, contribuindo para a expansão das áreas irrigadas.

A relação entre a ampliação da disponibilidade hídrica proporcionada pelo PISF e a expansão das áreas agrícolas em sua zona de influência direta é objeto de análise por diversos pesquisadores. Freitas *et al.* (2023), a partir da utilização de imagens de drone avaliou que a transposição do Rio São Francisco impulsionou a expansão agrícola no município de Terra Nova (PE), no Eixo Norte do projeto. Isto apontou que a presença do canal viabilizou a criação de áreas irrigadas próximas à infraestrutura hídrica, resultando em mudanças paisagísticas e territoriais. As áreas sob influência direta do PISF apresentam maior diversificação e expansão das áreas cultivadas, enquanto regiões mais distantes dependem de atividades como a pecuária, com uso de vegetação nativa para a alimentação animal. Essa desigualdade no acesso à água reforça a necessidade de melhores estratégias de gestão hídrica para garantir uma distribuição mais equitativa dos recursos. As modificações no uso do solo na região de influência da transposição do Rio São Francisco refletem a maior oferta de água proporcionada pelo projeto, ainda que a irrigação não seja seu uso prioritário. Grande parte da literatura sobre essas regiões destaca a importância da água para o desenvolvimento territorial e econômico, especialmente na agricultura.

Silveira *et al.* (2022) obtiveram resultados semelhantes ao analisarem a bacia hidrográfica do rio Terra Nova, beneficiada pelo Eixo Norte do Projeto de Integração do São Francisco (PISF). Os autores identificaram valores de NDVI superiores a 0,4, especialmente em áreas próximas aos reservatórios, indicando a presença de agricultura irrigada. O aumento da disponibilidade hídrica na região também favoreceu o crescimento de áreas agrícolas em locais próximos aos reservatórios entre os anos de 1998 e 2018, evidenciando as mudanças promovidas pela maior oferta de água na região.

No entanto, Castro e Cerezini (2022) apresentam um contraponto ao diferenciar o potencial de expansão agrícola do potencial efetivo. Em sua análise da área plantada e destinada à colheita de lavouras temporárias e permanentes na região de influência do PISF, entre 1995 e 2019, os autores identificaram uma redução significativa da área cultivada, que passou de, aproximadamente 2,5 milhões de hectares para 1,14 milhão de hectares. Além disso, destacam que, com exceção de 1998, o período entre 2012 e 2013 apresentou uma redução de 33% na área plantada, possivelmente associada à seca de 2012, que se estendeu até 2017 e impactou severamente a produção agrícola da região. A área potencialmente irrigável nas sub-bacias receptoras do PISF é relativamente baixa e, segundo os autores, tende a ser superestimada em estudos divulgados pela ANA e pelo Ministério do Desenvolvimento. Essa superestimação ocorre devido ao investimento em solos com baixa aptidão agrícola, o que dificulta a viabilidade da irrigação no curto e médio prazo.

As análises reforçam a complexidade da gestão hídrica nas regiões de influência do PISF, evidenciando a necessidade de uma caracterização detalhada das condições ambientais, hídricas e climáticas para garantir a expansão agrícola sustentável e evitar a repetição de falhas de gestão observadas na AID. A experiência com perímetros públicos irrigados, como o Perímetro Irrigado de Custódia, planejado pela Codevasf e DNOCS, exemplifica os desafios enfrentados. Os problemas de gestão e a incompatibilidade com a disponibilidade hídrica e as características locais resultaram em sérios desafios, como a salinização do solo e o rebaixamento do volume da barragem de Custódia, levando à perda da produtividade agrícola e à inviabilização da produção de alimentos na região. Nesse contexto, a avaliação do potencial agrícola das áreas receptoras do PISF, realizada no âmbito dos estudos de viabilidade da irrigação em Pernambuco, conduzidos no âmbito do Comitê da bacia hidrográfica do rio São Francisco, concluiu que a chegada da transposição permite a

reativação de alguns perímetros irrigados nas bacias do Moxotó, Pajeú e Terra Nova. Contudo, essa retomada exige uma avaliação pedológica criteriosa para mitigar os riscos de salinização e garantir a viabilidade hídrica, considerando as limitações naturais da região (HIDROBR, 2022).

Nesse contexto, Silva *et al.* (2020) destacam que o planejamento e a implementação de estratégias sustentáveis na gestão dos recursos hídricos são essenciais para mitigar os impactos ambientais, especialmente diante da expansão de áreas com solo exposto e da conversão de florestas em pastagens, o que compromete o balanço energético no semiárido. Além disso, os autores ressaltam que a escassez de chuvas e o aumento da temperatura intensificam os riscos de degradação ambiental. Concluem que as mudanças no uso do solo ao longo do tempo têm agravado a redução da vegetação e dos recursos hídricos, contribuindo para alterações no microclima local e para um déficit hídrico mais severo.

Um outro aspecto relevante a ser analisado é a distribuição e a variação dos corpos hídricos na AID ao longo do tempo. Comparando os anos de 1985, 2005 e 2023, observa-se que os recursos hídricos passaram por períodos de retração e expansão. No SAVI de 2023 (Figura 23) verifica-se a presença dos reservatórios construídos pelo PISF, com valores de SAVI < 0 , representando acréscimos significativos para a disponibilidade hídrica da região sob influência do projeto.

Nos anos anteriores, a modificação mais expressiva foi a construção da Usina Hidrelétrica Luiz Gonzaga, pertencente à Eletrobras Chesf, concluída em 1988 para geração de energia, que resultou na inundação de áreas à montante do barramento. Na imagem de 2005 identifica-se a formação da Lagoa de Itaparica, inexistente na imagem de 1985. Ao longo dos anos seguintes, a lagoa contribuiu para a expansão da área agrícola e viabilizou a própria construção do PISF, cujo Eixo Leste capta água a partir da lagoa.

Barros *et al.* (2023) também analisaram as mudanças nos corpos hídricos da região beneficiada pelo PISF entre 2013 e 2023, identificando uma expansão devido à construção de reservatórios artificiais. Em uma análise temporal mais ampla, verifica-se que a presença de corpos hídricos menores, como açudes e pequenos reservatórios, tende a apresentar maior variabilidade, influenciada por impactos ambientais e climáticos. Nesse contexto, as políticas de açudagem no semiárido desempenham um papel central, uma vez que estão diretamente relacionadas às transformações na configuração hídrica.

Embora as políticas de mitigação dos efeitos da seca no semiárido remontem ao período imperial, a criação do DNOCS possibilitou, de forma mais efetiva, a construção de grandes reservatórios e açudes para reduzir a vulnerabilidade hídrica da região (Pereira Neto, 2017). Comparando os resultados do SAVI < 0 para as cenas de 1985, observa-se que pequenos reservatórios tendem à extinção nos anos seguintes, não apresentando mais resposta espectral nas imagens mais recentes, o que pode ser atribuído, em grande parte, às alterações climáticas que impactam a disponibilidade hídrica na AID e, conseqüentemente, o volume dos reservatórios.

As mudanças climáticas tendem a reduzir os volumes dos reservatórios em regiões semiáridas devido à menor precipitação, ao aumento da evaporação e à redução da recarga de aquíferos. Projeções indicam quedas de até 77% na recarga subterrânea e 72% no escoamento superficial até o final do século, sob cenários de maior aridez (Montenegro; Ragab, 2010), impactando diretamente a disponibilidade hídrica superficial. Reservatórios de menor porte são particularmente vulneráveis, submetidos a reduções hídricas mais acentuadas que o fluxo médio anual e apresentando maior suscetibilidade às mudanças climáticas (Granados *et al.*, 2021).

Observa-se, com base nos valores estatísticos, uma expressiva variação espaço-temporal nas classes de SAVI, evidenciando mudanças no vigor vegetativo e no uso e cobertura do solo na AID ao longo dos últimos 38 anos, corroborando as análises anteriores com relação à espacialização dos valores de SAVI na AID. Os valores estatísticos (Tabela 1) destacam alterações significativas, sobretudo nos valores máximos do SAVI, que apresentam um aumento gradual ao longo das décadas. A exceção é a cena de 24/10/2023, que registra um valor próximo a 1, destacando-se entre os valores máximos observados.

Tabela 1: Valores estatísticos mínimo, máximo, média e desvio padrão obtidos na para o Índice de Vegetação Ajustado do Solo (SAVI) para as datas das cenas landsat

SAVI	Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão
26/10/1985	-0.33	0.72	0.2	0.04
01/10/1985	-0.34	0.71	0.19	0.05
02/11/2005	-0.29	0.72	0.10	0.03
24/10/2005	-0.8	0.97	0.10	0.07

03/10/2023	-0.35	0.78	0.25	0.04
26/10/2023	-0.49	0.76	0.21	0.07

Fonte: Aautora (2025)

Valores de SAVI superiores a 0,6 indicam uma vegetação com elevado vigor vegetativo e, na AID, estão majoritariamente associados à expansão agrícola e aos brejos de altitude, como a Reserva Ambiental da Serra Negra, localizada entre os municípios de Tacaratu, Floresta e Inajá, que se sobressai ao longo dos anos analisados pelo alto índice de vegetação. Os valores máximos do SAVI em 1985 variam entre 0,71 e 0,72, enquanto em 2023 atingem entre 0,76 e 0,78. Esse incremento sugere a consolidação de áreas irrigadas, especialmente no sudoeste da AID, abrangendo o município de Floresta. Segundo dados do Levantamento da Produção Agrícola Municipal (2023), Floresta concentra o maior número de hectares destinados à produção agrícola entre os municípios da AID.

Os valores mínimos negativos do SAVI estão associados a corpos hídricos, representativos na área de estudo devido à proximidade com o rio São Francisco e à presença de reservatórios, essenciais para o armazenamento de água no semiárido. Em 1985, o SAVI médio variou entre 0,19 e 0,20, indicando vegetação esparsa a moderada, com baixa variabilidade espacial. Os valores máximos (0,71-0,72) refletem uma vegetação mais densa, servindo como referência para análises futuras. Em 2005, observa-se uma redução na média do SAVI para 0,10, sugerindo uma degradação da vegetação. O aumento da variabilidade indica uma paisagem mais heterogênea, possivelmente fragmentada. O valor máximo de 0,97 sugere a permanência de áreas vegetadas, enquanto a elevada resposta espectral na cena de 24/10/2005 pode estar relacionada às variações na precipitação durante o período seco.

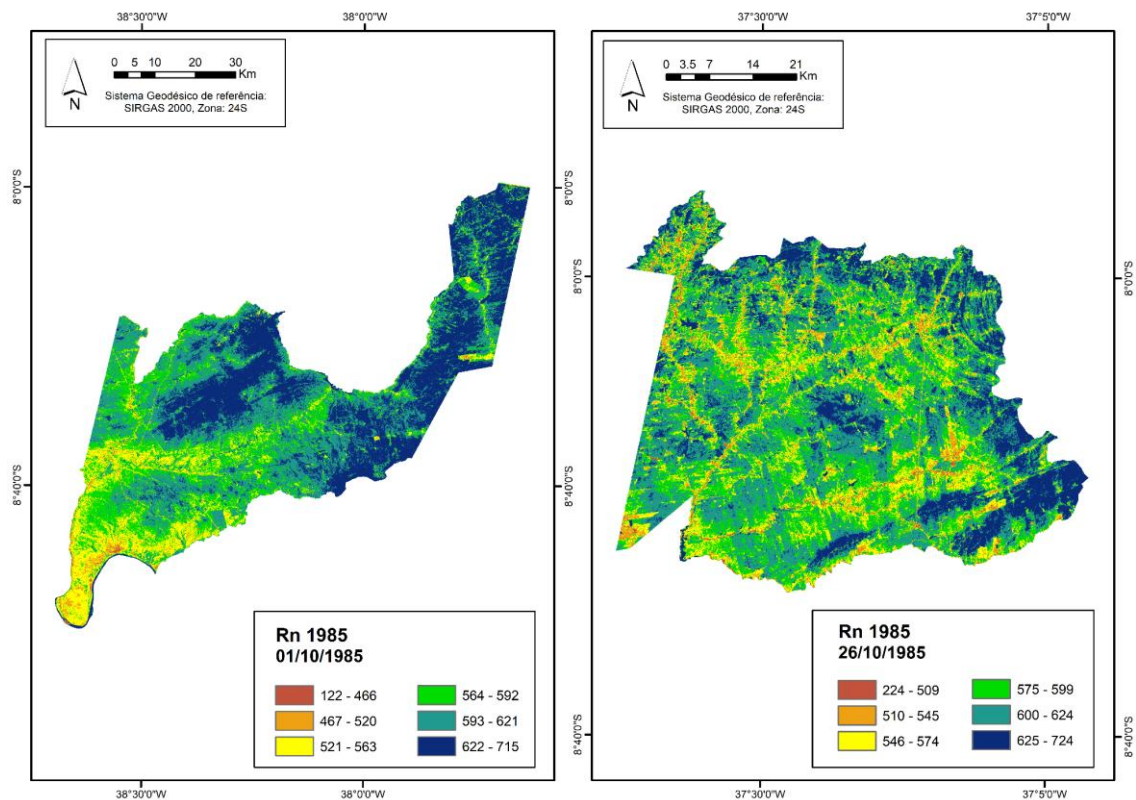
Há uma intrínseca relação entre os fatores climáticos e a vegetação, e a resposta espectral da vegetação varia conforme esses fatores, como analisado por Silva *et al.* (2024). Estes autores identificaram para o núcleo de desertificação de Cabrobó, que os valores do SAVI variaram de -0,84 a 0,90, com picos em 2011 e 2022 devido aos eventos de *La Niña*, que trouxeram maiores chuvas. Em contrapartida, anos com *El Niño* (2002, 2010, 2014) mostraram altos valores de SAVI, mas com menor precipitação. Entre 1994 e 2016, os valores mais baixos de SAVI coincidiram com anos de *El Niño* intenso, indicando condições de seca e altas temperaturas. Os

resultados evidenciam as variações na série temporal dos dados de vegetação, as quais estão relacionadas à sazonalidade climática e às influências atmosféricas. No entanto, mesmo dentro dos períodos chuvosos e secos do semiárido, observam-se variações climáticas que impactam a resposta da vegetação.

4.2.2 Saldo de radiação (Rn)

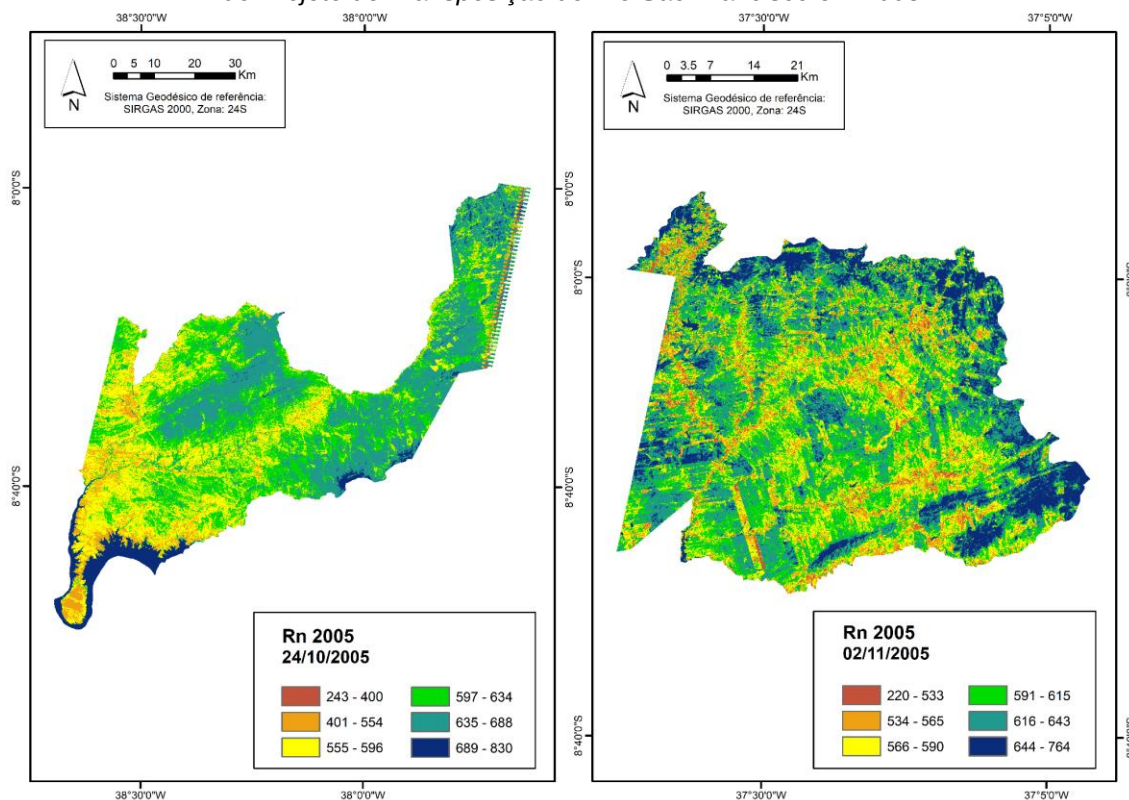
As Figuras 24, 25 e 26 apresentam os mapas temáticos do saldo de radiação (Rn), expresso em W/m^2 , para a AID nos anos de 1985, 2005 e 2023. O saldo de radiação é um parâmetro fundamental no balanço energético da superfície terrestre, influenciando diretamente o clima, a disponibilidade hídrica e os ecossistemas. Rn representa a quantidade de energia disponível para processos como o aquecimento do solo, a evapotranspiração e o aquecimento do ar. Sua variação é controlada por fatores atmosféricos, incluindo as propriedades radiométricas, a transmissividade e a emissividade atmosférica efetiva, que determinam a diferença entre a radiação recebida e a emitida pela superfície (Querino, Lopes Junior e Moura, 2022).

Figura 24: Saldo de radiação ($W\ m^{-2}$) nas cenas Landsat que abrangem a Área de Influência Direta do Projeto de Transposição do Rio São Francisco em 1985



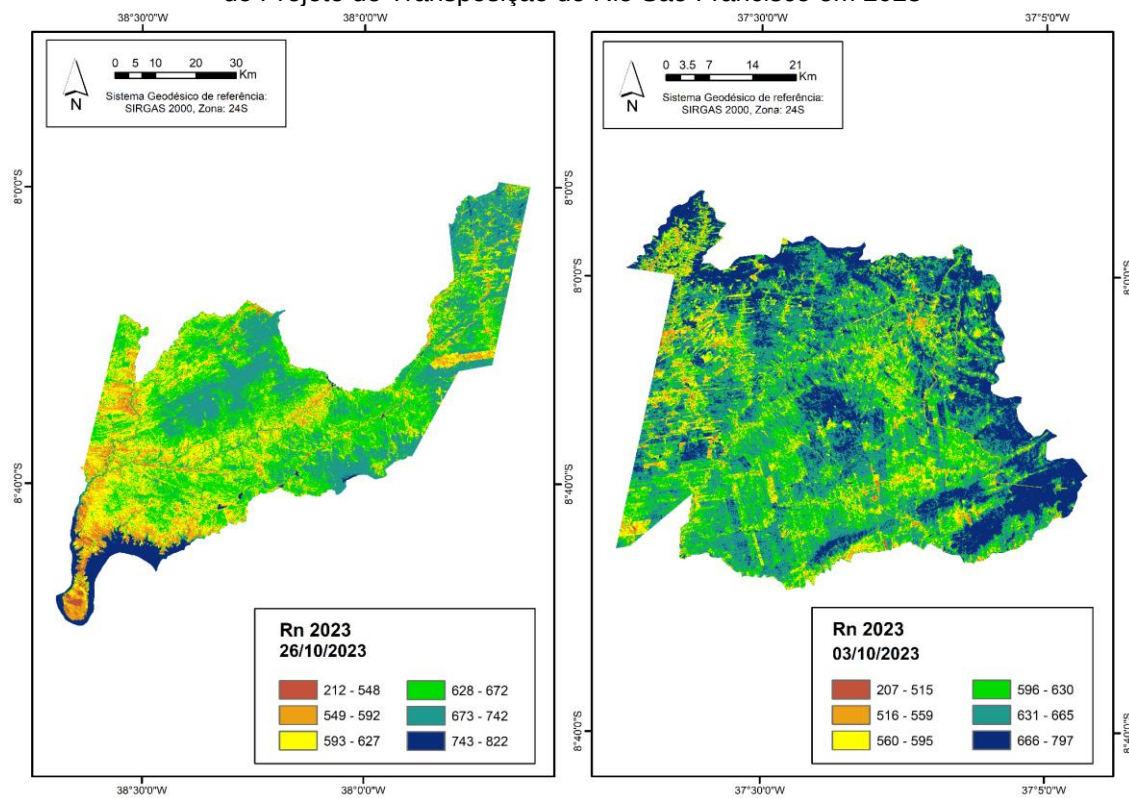
Fonte: Autora (2025)

Figura 25: Saldo de radiação ($W m^{-2}$) nas cenas Landsat que abrangem a Área de Influência Direta do Projeto de Transposição do Rio São Francisco em 2005



Fonte: Autora (2025)

Figura 26: Saldo de radiação ($W m^{-2}$) nas cenas Landsat que abrangem a Área de Influência Direta do Projeto de Transposição do Rio São Francisco em 2023



Fonte: Autora (2025)

A análise das imagens de saldo de radiação (R_n) para os anos de estudo revela mudanças significativas no comportamento da radiação líquida na AID. As imagens de saldo de radiação apresentam um padrão espacial característico da região semiárida, com variação nos valores de R_n de acordo com a cobertura do solo, umidade e características topográficas. É possível identificar mudanças ambientais provocadas pelo efeito da seca e pela ação antrópica.

A imagem de 1985 apresenta um padrão caracterizado por altos valores de saldo com os valores máximo variando entre 622 W/m^2 e 724 W/m^2 . As regiões com cobertura vegetal mais densa exibem maior retenção de energia, enquanto áreas urbanas e com solo exposto demonstram valores reduzidos. A distribuição dos valores indica que, nesse período, a superfície terrestre ainda possuía um equilíbrio energético significativo, com extensas regiões mantendo um saldo de radiação relativamente elevado.

Na imagem de 2005 observa-se uma modificação na distribuição espacial do saldo de radiação, com maior variabilidade nos valores. As cenas apresentam uma tendência de redução do saldo de radiação, reflexo da remoção da vegetação original e da consequente diminuição da capacidade da superfície de reter energia. Ainda assim, algumas regiões naturais mantêm valores elevados, sugerindo que, apesar da diminuição dos valores de R_n , há remanescentes vegetacionais que preservam características energéticas similares às observadas em 1985.

Embora parâmetros biofísicos, como a temperatura da superfície e o albedo, se correlacionam melhor com o saldo de radiação, os índices de vegetação também demonstram relação com o R_n e representam influência na resposta da superfície às transformações ambientais (Silva *et al.*, 2015). Comparando os resultados de cobertura vegetal apresentados pelo SAVI, infere-se que as imagens 2005 apresentam uma resposta energética compatível com os índices de vegetação analisados para o mesmo período. As áreas de maior elevação topográfica continuam a expressar valores acentuados de radiação devido ao maior vigor da cobertura vegetal de Caatinga densa com valores de R_n acima de 644 W/m^2 . Destacam-se as áreas de solo exposto e vegetação esparsa que apresentam valores de radiação até 600 W/m^2 , em média, o que indica que os valores R_n e consecutivamente a disponibilidade para a ocorrência de evapotranspiração se relacionam com a cobertura e vigor vegetativo. Luz e Galvêncio (2022), utilizando imagens de drone no município de Verdejantes, também no semiárido pernambucano, durante o mês de

março de 2022, encontraram valores de saldo de radiação de aproximadamente 1100 W/m² em áreas de caatinga densa. Em superfícies lacustres, registou-se um valor em torno de 780 W/m². Para áreas de agricultura irrigada, o saldo foi de aproximadamente 1000 W/m², enquanto em áreas de solo exposto ou em preparo para plantio, os valores ficaram em torno de 900 W/m².

As cenas de 2023 revelam uma redução do saldo de radiação em várias regiões, embora, quando comparado a 2005, haja um aumento na energia disponível na superfície, considerando que, como discutido anteriormente, 2005 foi um ano fortemente impactado pelas secas que afetaram o semiárido brasileiro no início dos anos 2000. Os valores máximos para o ano variaram entre 797 W/m² e 822 W/m² e os mínimos variaram entre 207 W/m² e 212 W/m². A heterogeneidade dos valores se torna ainda mais evidente, refletindo uma superfície terrestre com maior variação na absorção e na emissão de energia. A expansão das áreas de menor saldo de radiação indica um aumento da exposição do solo, o que está associado à intensificação do uso da terra e aos processos de degradação ambiental. Além disso, a maior variabilidade espacial dos valores de R_n sugere um cenário mais dinâmico, com influências tanto antrópicas quanto climáticas atuando na modificação do balanço energético. Merece atenção o fato de que a região sudoeste da AID apresenta, ao longo dos anos, variações mais expressivas no saldo de radiação. Essas diferenças estão associadas à maior diversificação produtiva e à expansão das áreas irrigáveis na região, em contraposição às áreas sob processo de desertificação, que avançam no centro-oeste do município de Floresta. Esse município, por sua vez, integra o núcleo de desertificação de Cabrobó.

É relevante ressaltar que os valores máximos de saldo de radiação (R_n), em todas as imagens analisadas também estão associados à presença de corpos hídricos, incluindo pequenos açudes e reservatórios. Nos anos de 2005 e 2023, a água do lago de Itaparica, que inundou a região sudoeste da AID, também influenciou os valores máximos de R_n, atingindo 830 W/m². Silva, Lopes e Azevedo (2005), em estudo realizado nas áreas irrigadas do Projeto Senador Nilo Coelho e em parte da zona urbana dos municípios de Petrolina (PE) e Juazeiro (BA), identificaram que o Lago de Sobradinho apresentou os maiores valores de R_n, ultrapassando 712,2 W/m². Em contrapartida, as menores taxas de R_n foram estimadas em áreas de solo exposto, atingindo 458,1 W/m². Os resultados são compatíveis com os encontrados para a AID, embora os valores identificados para áreas de solo exposto sejam menores do que os

observados para os anos de 1985, 2005 e 2023. Essa diferença pode estar relacionada ao cálculo da transmissividade, que influencia diretamente a radiação de onda curta incidente e, conseqüentemente, o saldo de radiação.

Patriota *et al.* (2023) ao avaliarem séries de dados de Rn para o município de São José do Egito, no semiárido pernambucano, identificaram um pico médio de Rn diurno no mês de outubro, atingindo 735,50 W/m². Os autores destacam que a maior incidência solar, aliada à uma menor cobertura de nuvens e ao clima seco, contribui para o acúmulo de energia na superfície, resultando em saldos elevados de radiação nesse período. Além disso, a análise de tendência das séries temporais mensais revelou um aumento dos valores de Rn diurno entre 2003 e 2022, evidenciando a influência de fatores climáticos no aumento do saldo de radiação.

A comparação das cenas referentes aos três anos analisados evidencia uma tendência de redução do saldo de radiação ao longo das décadas. Os períodos de seca e escassez hídrica influenciam diretamente a quantidade de energia disponível para os processos de repartição no balanço de energia e evapotranspiração da superfície. Esse efeito é notável no ano de 2005, que se destaca pela ampla ocorrência de solos expostos e pela retração da vegetação arbustiva. Embora, também, seja possível perceber uma tendência a valores mais elevados de saldo de radiação, esses estão relacionados à presença de massas de água e à expansão da agricultura irrigada na região.

Silva *et al.* (2021) identificaram que mudanças nos parâmetros biofísicos evidenciaram a presença de áreas com solo exposto, especialmente nos anos secos, no município de Arcoverde, que estabelecem uma relação com a repartição de energia na superfície. O saldo de radiação na região apresentou variações associadas às mudanças na cobertura e na densidade da vegetação da caatinga. Os autores observaram que os valores de saldo de radiação variaram entre 0,0 e 800 W/m² no período de 2008 a 2017, destacando que os maiores valores se concentraram em áreas com vegetação mais densa e em regiões irrigadas, onde a repartição de energia ocorre de forma mais equilibrada. Os menores valores de Rn foram identificados em solos expostos e áreas urbanizadas, corroborando a espacialização dos valores do saldo de radiação na AID.

A expansão das áreas de menor saldo de radiação sugere um aumento da exposição do solo e possíveis impactos ambientais relacionados à degradação da cobertura vegetal. Além disso, as diferenças entre regiões naturais e agrícolas se

tornam mais evidentes, demonstrando um cenário de maior fragmentação e variabilidade espacial dos valores de R_n .

Comparando os valores estatísticos descritivos para as imagens analisadas, percebe-se que os valores mínimos, máximos, médios e desvio padrão acompanham as mudanças ambientais identificadas. A Tabela 2 apresenta os valores estatísticos do saldo de radiação (R_n) para as diferentes datas de aquisição das imagens Landsat nos anos de 1985, 2005 e 2023.

Tabela 2: Valores estatísticos mínimo, máximo, média e desvio padrão obtidos na para o Saldo de Radiação (R_n) em W/m^2 , para as datas das cenas landsat

R_n	Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão
26/10/1985	227	598	598	32
01/10/1985	223	723	597	31
02/11/2005	220	764	607	35
24/10/2005	257	830	617	48
03/10/2023	207	797	637	38
26/10/2023	211	822	651	50

Fonte: Autora (2025)

O saldo de radiação é um dos principais componentes do balanço de energia da superfície e influencia diretamente a evapotranspiração e a disponibilidade hídrica na região semiárida estudada. A análise dos valores estatísticos do saldo de radiação (R_n) ao longo de quase quatro décadas revela um aumento progressivo da média, passando de 597-598 W/m^2 em 1985 para 607-617 W/m^2 em 2005 e atingindo 637-651 W/m^2 em 2023. Esse crescimento está relacionado à fragmentação e às mudanças na cobertura do solo, como a redução da vegetação natural e o aumento de áreas agrícolas, além de efeitos das mudanças climáticas e das variações atmosféricas que influenciam a radiação incidente e a resposta da superfície terrestre.

Os valores mínimos de R_n apresentaram uma redução ao longo dos anos, indo de 227 W/m^2 , em 1985, para 220 W/m^2 , em 2005, e chegando a 207 W/m^2 , em 2023. Isto está relacionado à maior heterogeneidade na superfície, com aumento de áreas

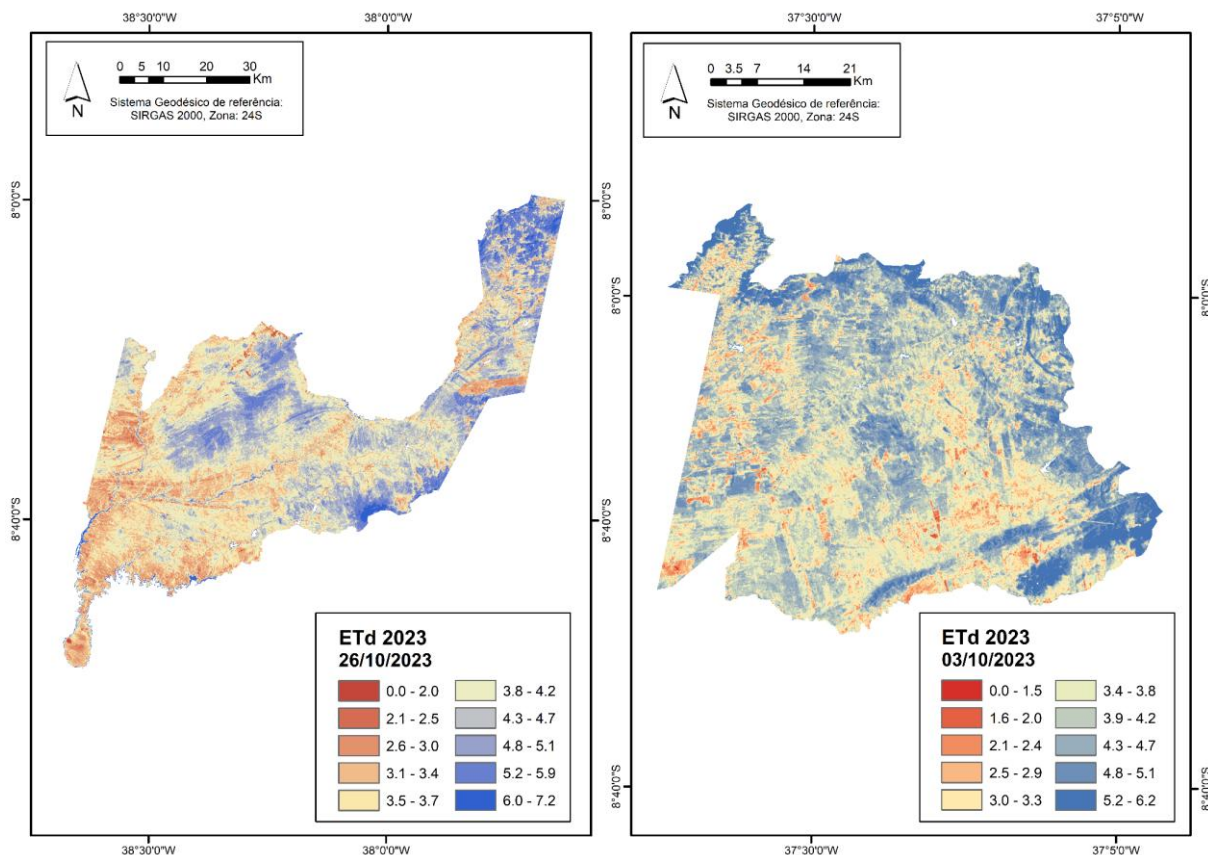
de solo exposto. Os valores máximos cresceram significativamente, de 723 W/m², em 1985, para 830 W/m², em 2005, e 822 W/m², em 2023, sugerindo que algumas áreas estão absorvendo mais radiação.

A variabilidade dos valores de Rn também aumentou, conforme evidenciado pelo crescimento do desvio padrão de 31-32 W/m², em 1985, para 38-50 W/m², em 2023. Isso sugere uma maior dispersão dos valores espaciais, possivelmente devido ao aumento da fragmentação da vegetação, maior presença de áreas irrigadas e solos expostos, além dos impactos de mudanças nas condições atmosféricas.

4.2.3 Evapotranspiração diária (ETd)

No que se refere à evapotranspiração na AID, a Figura 27 apresenta o mapa temático para os resultados da evapotranspiração diária (mm/dia) para as cenas correspondentes a 2023. A ausência de dados meteorológicos essenciais ao balanço de energia nas estações inseridas nos limites das cenas de 1985 e 2005 impossibilitou a execução completa do modelo SEBAL para esses períodos. Dessa forma, o cômputo da evapotranspiração diário foi realizado apenas para 2023, permitindo a obtenção de valores diários de evapotranspiração para cada cena que recobre a AID no ano citado. Conforme destacam Lima *et al.* (2021), a evapotranspiração real (ETr) desempenha um papel crucial no balanço hídrico, especialmente em ecossistemas semiáridos e em áreas agrícolas irrigadas. Diante do aumento da demanda por alimentos e da crescente pressão sobre os recursos hídricos, a compreensão dos fluxos de energia e do balanço radiativo torna-se essencial para a gestão eficiente da água, garantindo a sustentabilidade hídrica e a produtividade agrícola.

Figura 27: Evapotranspiração diária (mm/dia) nas cenas Landsat que abrangem a Área de Influência Direta do Projeto de Transposição do Rio São Francisco em 2023



Fonte: Autora (2025)

Embora não tenha sido possível processar a evapotranspiração para 1985 e 2005, devido a indisponibilidade de dados climáticos diários para as ambas as cenas na data e horário de passagem do satélite, a análise referente a 2023 é fundamental para a compreensão da demanda hídrica atual da região. A evapotranspiração constitui um parâmetro-chave do ciclo hidrológico, diretamente relacionado à demanda hídrica das culturas agrícolas e da vegetação natural. Mesmo sem uma série temporal, os dados de 2023 fornecem uma base para a estimativa da disponibilidade e do consumo hídrico na região, contribuindo para a formulação de estratégias de gestão sustentável dos recursos hídricos em um cenário de escassez característica do semiárido.

A Figura 27 ilustra a distribuição espacial dos valores de evapotranspiração diária, evidenciando padrões que possibilitam uma avaliação mais detalhada da dinâmica hídrica regional que se relaciona diretamente aos parâmetros biofísicos e à resposta do Saldo de Radiação (R_n). Visando aprimorar a análise dos valores estatísticos e a visualização espacial da evapotranspiração nos mapas, foram

removidos os dados referentes aos corpos hídricos da área de estudo, uma vez que a evapotranspiração de reservatórios não é o foco desta pesquisa. Além disso, a exclusão desses valores contribui para uma representação mais fidedigna dos padrões espaciais da evapotranspiração na superfície terrestre. Para ambientes lacustres, há metodologias específicas que permitem uma avaliação mais precisa das variações evaporativas.

As imagens de evapotranspiração diária (ETd) para 2023 apresentam variações espaciais significativas, refletindo diferenças no uso e cobertura do solo, bem como nas condições meteorológicas locais. As áreas com os maiores valores de ETd, variando entre 4,8 e 7,2 mm/dia (26/10/2023) e 4,3 e 6,2 mm/dia (03/10/2023), concentram-se predominantemente em regiões associadas à vegetação de caatinga com porte mais denso, áreas irrigadas nas proximidades de corpos hídricos e brejos de altitude que também apresentam respostas mais elevadas em relação à espacialização dos valores de SAVI para 2023.

Por outro lado, as áreas com os menores valores de ETd, variando com valores de evapotranspiração próximos de 3 mm/dia, correspondem a regiões de solo exposto, e possuem limitada disponibilidade hídrica, características comuns em áreas degradadas ou de uso agrícola intensivo sem irrigação. Ao comparar as áreas identificadas como solo exposto pelo Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI) com o mapa de evapotranspiração, observa-se que essas regiões correspondem, em grande parte, a áreas de sequeiro ociosas e/ou em descanso. Esse tipo de agricultura depende diretamente das chuvas, e, durante o período seco, as lavouras não irrigadas são colhidas, resultando na ausência de cobertura vegetal significativa. Como resposta espectral, essas áreas são detectadas pelo SAVI como solo exposto, uma vez que a vegetação se encontra escassa ou inexistente, enquanto no mapa de evapotranspiração, elas apresentam baixos valores, refletindo a redução na transpiração das plantas e na evaporação da superfície do solo.

Em solos expostos de regiões secas e semiáridas, a escassez de água disponível para evaporação resulta na dissipação da maior parte da energia solar na forma de calor sensível. Na ausência de umidade no solo, a evapotranspiração é limitada, levando à maior absorção de energia pela superfície e, conseqüentemente, ao aumento da temperatura do solo. Como resultado, uma parcela mais significativa do saldo de radiação é convertida em fluxo de calor sensível (Boratto e Gomide, 2013). Corroborando, Santos *et al.* (2024) ressaltam que as alterações no uso da terra

impactam os componentes do balanço energético, resultando em uma menor disponibilidade de energia e na redução dos fluxos de calor latente e sensível. Além disso, a variação sazonal dos fluxos de energia está diretamente relacionada à disponibilidade de água no ambiente.

No estudo de Bezerra, Bezerra e Regô (2021), os valores de evapotranspiração (ET) para o semiárido brasileiro variam conforme o tipo de cobertura do solo. O solo exposto apresentou ET inferior a 1,0 mm/dia, enquanto a vegetação nativa de caatinga, com pouca cobertura e sem folhas, teve valores entre 1,0 e 3,0 mm/dia. A vegetação de caatinga mais densa, por sua vez, exibiu valores de ET entre 3,0 e 5,0 mm/dia, com os maiores valores ocorrendo durante o período de maior precipitação. Em relação aos valores de ET para solo exposto, os resultados encontrados para 2023 na AID são mais elevados em relação aos identificados pelos autores, o que pode estar relacionado às condições locais no clima e na umidade do solo que influenciam diretamente a resposta evaporativa.

Ao correlacionar os resultados do saldo de radiação e do SAVI para as diferentes áreas, observa-se uma relação entre as maiores respostas espectrais da vegetação, o aumento da energia disponível no saldo de radiação e os valores elevados de evapotranspiração diária em ambas as cenas. O saldo de radiação é um fator determinante para a evapotranspiração, pois controla a disponibilidade energética necessária para a conversão da água em vapor. Além disso, fatores climáticos, como a velocidade do vento, influenciam a remoção da umidade da superfície, enquanto índices de vegetação, como o SAVI, indicam a densidade e a atividade fisiológica da cobertura vegetal, impactando diretamente a evapotranspiração.

Nas regiões onde o SAVI apresentou valores acima de 0,4, a evapotranspiração foi observada de até 5,0 mm/dia. Nessas áreas, o saldo de radiação foi superior a 631 W/m², indicando que a energia disponível poderia sustentar uma evapotranspiração mais elevada. No entanto, a vegetação moderada, refletida pelo SAVI de 0,4, e o déficit hídrico no solo limitam a evaporação e a transpiração. Dessa forma, mesmo em uma região semiárida, o valor de 5 mm/dia se mostra coerente, dado essas condições restritivas. Em regiões de brejos de altitude, caatinga mais densa e áreas irrigadas, onde o vigor vegetativo foi mais elevado e o SAVI se aproximou de valores máximos de 0,78, a evapotranspiração diária apresentou

valores entre 6 mm/dia e 7,2 mm/dia, indicando uma maior capacidade de evaporação devido ao aumento da cobertura vegetal.

Silva *et al.* (2024), ao analisarem imagens do sensor MODIS entre 2000 e 2019 para identificar vulnerabilidades no processo de degradação e desertificação no Nordeste brasileiro, destacam a relação entre a evapotranspiração e o comportamento espectral da cobertura vegetal. Os autores ressaltam a resposta de índices como NDVI, EVI, SAVI e LAI, evidenciando sua sensibilidade na análise de produtos MODIS para toda a região. Além disso, enfatizam a sazonalidade marcante dos parâmetros biofísicos em relação à pluviosidade ao longo do ano, reforçando a importância da precipitação para a dinâmica da vegetação na região semiárida. Os resultados, analisados pixel a pixel, indicaram que áreas com pouca ou nenhuma cobertura vegetal apresentam menor disponibilidade de energia para ser redistribuída nos processos de evapotranspiração, impactando diretamente a vegetação e as culturas agrícolas.

A comparação entre as datas analisadas evidencia padrões espaciais semelhantes, embora haja variações na intensidade dos valores de ETd. A cena de 26 de outubro de 2023 apresenta valores ligeiramente mais elevados nas regiões de maior evapotranspiração e uma distribuição espacial mais heterogênea. Na cena de 03 de outubro de 2023, observa-se uma leve redução na ETd, o que está associado às condições atmosféricas distintas nos dias de passagem do satélite, embora ambas as imagens sejam do mês de outubro há pequenas variações na radiação e na velocidade que interferem na energia disponível para a transformação da água em vapor.

Essas variações atmosféricas destacam a influência dos fatores meteorológicos na estimativa da evapotranspiração pelo modelo SEBAL. A velocidade do vento e a radiação global afetam diretamente o balanço de energia na superfície, interferindo no processo de evapotranspiração. Em particular, a velocidade do vento exerce um papel fundamental na remoção do vapor d'água da superfície e na troca de calor entre o solo e a atmosfera. Para ilustrar essa relação, a Tabela 3 apresenta os valores de velocidade do vento no horário de passagem do satélite para as cenas Landsat, bem como a soma da radiação diária.

Tabela 3: Dados de velocidade do vento no horário de passagem da imagem de satélite e soma da radiação global diária para o dia da imagem de satélite

Data	Velocidade do vento (M/s)	Radiação global (MJ/m²)
03/10/2023	3,3	25,62
26/10/2023	4,9	27,56

Fonte: Autora (2025)

No dia 26/10/2023, a velocidade do vento foi de 4,9 m/s, significativamente maior do que os 3,3 m/s registrados no dia 03/10/2023. Esse aumento pode intensificar a evapotranspiração em áreas com disponibilidade hídrica, pois facilita o transporte de umidade da superfície para a atmosfera. No entanto, em áreas secas ou sob estresse hídrico, essa maior ventilação pode levar a um aumento da temperatura da superfície, reduzindo a fração de energia disponível para a evapotranspiração e favorecendo a dissipação de calor sensível.

A radiação global, por sua vez, é o principal fator energético que impulsiona a evapotranspiração, pois fornece calor para a conversão da água líquida em vapor. No dia 26/10/2023, a soma da radiação global foi de 27,56 MJ/m², um pouco maior do que os 25,62 MJ/m² registrados no dia 03/10/2023. Esse aumento de energia disponível tende a favorecer a evapotranspiração, desde que haja água suficiente na superfície para evaporar. No dia 26/10/2023, a combinação de maior radiação e maior velocidade do vento sugere uma tendência de maior evapotranspiração em áreas úmidas, como reservatórios e vegetação nativa. No dia 03/10/2023, a menor radiação e a menor velocidade do vento indicaram uma evapotranspiração potencialmente mais baixa, mas sem grandes perdas de energia para o calor sensível.

Sabino e Souza (2023) analisaram a influência de variáveis climáticas na equação de Penman-Monteith, identificaram que a umidade relativa do ar e a velocidade do vento possuem maior sensibilidade durante a estação seca no bioma Cerrado, com impactos significativos na evapotranspiração de referência. Os resultados indicam que variações na radiação solar, umidade e velocidade do vento desempenham um papel determinante na dinâmica da evapotranspiração, especialmente em regiões áridas e semiáridas.

Além disso, os valores estatísticos descritivos das imagens são fundamentais, pois ajudam a compreender o comportamento geral dos dados e as tendências

observadas. A Tabela 4 apresenta os valores mínimos, máximos, médios e o desvio padrão das imagens de evapotranspiração para o ano de 2023.

Tabela 4: Valores estatísticos mínimo, máximo, média e desvio padrão obtidos na para a evapotranspiração diária, expressa em mm/dia, para as datas das cenas landsat

ETd	Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão
03/10/2023	0,0037	6,2	4,0	0,75
26/10/2023	0,023	7,2	4,1	0,77

Fonte: Autora (2025)

A análise dos dados estatísticos para as imagens de evapotranspiração para 2023 (Tabela 4) demonstra uma leve tendência de aumento da evapotranspiração diária (ETd) ao longo do mês de outubro de 2023. No dia 3 de outubro, os valores variaram entre 0,0037 mm/dia e 6,2 mm/dia, com uma média de 4,0 mm/dia e um desvio padrão de 0,75 mm/dia. No dia 26 do mesmo mês, observou-se um incremento nos valores mínimo e máximo, que passaram para 0,023 mm/dia e 7,2 mm/dia, respectivamente, enquanto a média aumentou para 4,1 mm/dia e o desvio padrão foi ligeiramente superior, atingindo 0,77 mm/dia.

A manutenção de valores semelhantes para o desvio padrão indica que a dispersão dos dados permaneceu relativamente estável. Como o desvio padrão mede o grau de variabilidade dos dados em relação à média, sua estabilidade sugere que, embora tenha havido um leve aumento na média e nos valores extremos de evapotranspiração, a distribuição espacial desses valores manteve um padrão semelhante ao longo do período analisado.

As variações observadas impactam diretamente o balanço hídrico, alterando a relação entre a entrada de água (chuva) e as saídas (evapotranspiração, escoamento e infiltração), com especial relevância para a agricultura em regiões semiáridas. Em tais regiões, um saldo de radiação elevado pode exigir maior irrigação para compensar as perdas de água por evapotranspiração. Com o agravamento das mudanças climáticas, o aumento do saldo de radiação pode intensificar a demanda hídrica, comprometendo a disponibilidade de água. Assim, a gestão eficiente dos recursos hídricos torna-se essencial para garantir a segurança hídrica e a sustentabilidade dos usos múltiplos da água.

A relação entre o saldo de radiação (R_n) e a evapotranspiração reforça a análise do balanço hídrico nas sub-bacias onde estão inseridos os reservatórios artificiais do PISF, que apresentam condições naturais de estresse hídrico. As projeções de mudanças climáticas indicam um agravamento dessas condições, impactando a disponibilidade e a segurança hídrica no semiárido. O aumento da demanda hídrica, em áreas irrigadas, e a maior vulnerabilidade da agricultura de subsistência, prejudicada pelas mudanças ambientais e climáticas, comprometem a resiliência e a sustentabilidade da atividade agrícola.

4.3 Avaliação da produção agrícola na AID e impactos do Déficit Hídrico

No semiárido, os desafios impostos pelas condições climáticas e a baixa disponibilidade hídrica tornam a agricultura uma atividade marcada pela resiliência e necessidade de adaptação constante. Nesse contexto, os municípios de Custódia, Sertânia e Floresta, que compõem a Área de Influência Direta (AID) do Eixo Leste da Transposição do Rio São Francisco (PISF), apresentam características agrícolas distintas, refletindo tanto suas potencialidades quanto às limitações impostas pelo clima e pelos recursos hídricos disponíveis.

Os principais produtos das lavouras temporárias e permanentes nos municípios de Custódia, Sertânia e Floresta, que compõem a AID do PISF, para o ano de 2023, estão apresentados nas Tabelas 5 e 6. Destacam-se características importantes, como a área destinada à colheita, que reflete o planejamento agrícola e a extensão das culturas no território; a área colhida, que indica a proporção efetivamente utilizada para produção e permite identificar perdas associadas a fatores como clima ou pragas; e a quantidade produzida, expressa em toneladas, que evidencia o volume total de produção das diversas culturas.

Tabela 5: Produtos das lavouras temporárias por município para o ano de 2023

Cultura	Município	Área destinada à colheita (ha)	Área colhida (ha)	Quantidade produzida (t)
Cebola	Custódia	-	-	-
	Sertânia	-	-	-
	Floresta	50	50	1750
Feijão	Custódia	3100	1250	290
	Sertânia	870	100	30

	Floresta	600	50	3
Mandioca	Custódia	11	11	108
	Sertânia	-	-	-
	Floresta	10	10	120
Melancia	Custódia	53	52	1510
	Sertânia	-	-	-
	Floresta	40	40	1000
Melão	Custódia	-	-	-
	Sertânia	-	-	-
	Floresta	200	200	7000
Milho	Custódia	4800	1120	800
	Sertânia	1450	430	115
	Floresta	600	20	1
Tomate	Custódia	11	11	429
	Sertânia	-	-	-
	Floresta	50	50	2500
Total	Custódia	7975	2444	-
	Sertânia	2320	530	-
	Floresta	1550	420	-

Fonte: A autora (2025). elaborado a partir dos dados da Produção Agrícola Municipal (PAM/IBGE).

Tabela 6: Produtos das lavouras permanente por município para o ano de 2023

Cultura	Município	Área destinada à colheita (ha)	Área colhida (ha)	Quantidade produzida (t)
Banana	Custódia	-	-	-
	Sertânia	5	2	14
	Floresta	17	17	221
Castanha de caju	Custódia	-	-	-
	Sertânia	-	-	-
	Floresta	8	8	4
Coco-da-bahia	Custódia	-	-	-
	Sertânia	-	-	-
	Floresta	10	10	150
Goiaba	Custódia	-	-	-
	Sertânia	-	-	-
	Floresta	10	10	500

Mamão	Custódia	-	-	-
	Sertânia	-	-	-
	Floresta	5	5	80
Total	Custódia	-	-	-
	Sertânia	5	2	-
	Floresta	50	50	-

Fonte: A autora (2025). elaborado a partir dos dados da Produção Agrícola Municipal (PAM/IBGE).

A análise da Produção Agrícola Municipal (PAM/IBGE) de 2023 evidencia a forte dependência regional de lavouras temporárias, em especial das culturas de milho e feijão, que ocupam as maiores áreas plantadas. Em Custódia, por exemplo, o milho ocupou 4.800 hectares e o feijão, 3.100 hectares, totalizando 7.975 hectares cultivados. Contudo, os níveis de produtividade foram baixos. Sertânia apresentou perfil semelhante, com 2.320 hectares dedicados às lavouras temporárias, sendo o milho e o feijão responsáveis por 1.450 ha e 870 ha, respectivamente. Já o município de Floresta, com uma área menor dedicada às lavouras temporárias (1.550 ha), destacou-se pela maior eficiência produtiva em culturas como cebola e melancia, compensando a menor extensão territorial.

Essas culturas predominantes são altamente vulneráveis ao déficit hídrico, uma vez que dependem diretamente das chuvas sazonais ou de sistemas de irrigação para alcançar boa produtividade. A irregularidade pluviométrica típica do semiárido compromete especialmente as fases críticas do ciclo das plantas, como floração e enchimento de grãos, impactando negativamente os rendimentos.

A vulnerabilidade é ainda mais acentuada no caso de culturas com alta exigência hídrica e baixa tolerância ao estresse, como melancia, tomate e melão, presentes na região de acordo com o levantamento do PAM para 2023. A melancia, por exemplo, alcançou 2.510 toneladas produzidas, com boa relação entre área plantada e colhida, sendo cultivada principalmente em Custódia e Floresta. Entretanto, essa cultura é altamente dependente de irrigação, especialmente em regiões semiáridas marcadas por intensa insolação e altas temperaturas, que elevam a evapotranspiração e, conseqüentemente, a demanda por água (Lima, 2014).

Culturas como tomate e melão, cultivado em pequena escala nos municípios de Custódia e Floresta, enfrenta desafios similares, exigindo irrigação constante e práticas adequadas de manejo para evitar perdas. Com o agravamento do déficit hídrico, intensificado pelas mudanças climáticas, a manutenção dessas culturas se

torna cada vez mais difícil. Estudos apontam que a demanda hídrica agrícola pode aumentar até 17% nos próximos anos (Montenegro *et al.*, 2009; Bonetti *et al.*, 2022).

Para fins comparativos, destaca-se a situação da África do Sul, onde 80% do território é árido ou semiárido e apenas 12% é apto ao cultivo de sequeiro. A forte dependência da irrigação torna a agricultura extremamente vulnerável à redução das chuvas e à intensificação das secas, afetando diretamente a produtividade, a renda rural e a segurança alimentar - sobretudo em comunidades que ainda dependem de cultivos de sequeiro para subsistência (Bonetti *et al.*, 2022).

Quanto às lavouras permanentes, o município de Floresta apresenta a maior área produtiva (50 ha), com destaque para o coco-da-bahia (10 ha) e a castanha de caju, além de cultivos como mamão e banana. Tais culturas contribuem para a diversificação da produção e geração de renda, mas também requerem irrigação contínua. A escassez hídrica compromete tanto o desenvolvimento das plantas quanto a qualidade dos frutos. Em Custódia e Sertânia, as lavouras permanentes ocupam áreas menores, mas enfrentam desafios similares.

A análise integrada dos dados revela que Floresta apresenta maior diversificação e melhor desempenho produtivo, especialmente em culturas com maior valor agregado e manejo hídrico mais eficiente. Em contrapartida, Custódia e Sertânia demonstram menor produtividade, variedade limitada de cultivos e maior vulnerabilidade hídrica. Esses resultados dialogam com os dados obtidos na modelagem hidrológica e na análise por sensoriamento remoto, reforçando que, embora inseridos no semiárido, os municípios da AID apresentam diferenças ambientais e na disponibilidade de recursos hídricos que afetam o desempenho agrícola.

Esse cenário evidencia a necessidade de políticas públicas específicas voltadas à gestão eficiente da água, considerando a diversidade agrícola e os distintos perfis de demanda hídrica entre os municípios da AID. Práticas conservacionistas no uso da terra, técnicas de irrigação mais eficientes e incentivos à adaptação tecnológica tornam-se indispensáveis para garantir a segurança hídrica e alimentar da região.

A baixa produtividade observada na porção Nordeste da AID, que compreende os municípios de Custódia e Sertânia, está associada a níveis reduzidos de umidade do solo e a um déficit hídrico acentuado, conforme indicado pelos resultados do balanço hídrico, sobretudo durante os meses de maior estresse climático. Em

contraste, o município de Floresta, situado na porção sudoeste da AID, apresenta maior proximidade com o rio São Francisco, o que favorece a disponibilidade hídrica e contribui para sua performance agrícola superior.

A gestão sustentável dos recursos hídricos é condição essencial para a manutenção da atividade agrícola nos territórios semiáridos. Estratégias integradas que considerem a variabilidade climática e promovam o uso racional da água são fundamentais para mitigar os efeitos da escassez e assegurar a resiliência produtiva das comunidades locais. Considerando o potencial de desenvolvimento proporcionado pela ampliação da oferta hídrica via PISF, é urgente a articulação entre produtores, gestores públicos e políticas eficazes de governança da água para garantir a sustentabilidade da produção agrícola na AID frente às mudanças climáticas e à crescente pressão sobre os recursos hídricos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo demonstrou que a Área de Influência Direta do PISF possui dificuldades e limitações de ordem natural que são intensificadas pela ação humana e mudanças climáticas. Considerando a perspectiva de crescimento das áreas de agricultura irrigada, as problemáticas hidrológicas, econômicas e ambientais podem ser previstas, e desta forma ações de gestão e manejo da água podem ser implementadas. O Projeto de Integração do São Francisco (PISF) pode desempenhar um papel significativo na mitigação dos impactos das mudanças climáticas e do déficit hídrico na região semiárida. Contudo, para que os benefícios do projeto sejam efetivamente maximizados, é imprescindível implementar estratégias de gestão agrícola e hídrica eficientes. Essas estratégias devem ser direcionadas de forma específica para as áreas de maior vulnerabilidade, com o objetivo de minimizar os efeitos adversos das mudanças climáticas e garantir uma gestão sustentável e adaptativa dos recursos hídricos e agrícolas na região.

1. Importância da Umidade do Solo: A umidade do solo é crucial para o crescimento e o desenvolvimento das plantas, desempenhando um papel essencial nos processos fisiológicos como fotossíntese e transpiração. A falta de umidade adequada pode reduzir a produtividade das culturas e impactar negativamente a economia agrícola, especialmente em regiões semiáridas dependentes da agricultura de sequeiro. As sub-bacias do Rio Pajeú demonstram uma maior capacidade de retenção de água no solo em comparação com as sub-bacias do Rio Moxotó, o que sugere uma maior resiliência hídrica nas áreas associadas ao Pajeú, embora toda a região semiárida apresente limitações hídricas.
2. Impactos das Mudanças Climáticas: O cenário de mudanças climáticas simulado (Cen1), que inclui um aumento de 2,5°C na temperatura e uma redução de 22% na precipitação, revela uma redução significativa nos níveis de umidade do solo, particularmente nas sub-bacias do Rio Moxotó. Essa redução é menos acentuada nas sub-bacias do Rio Pajeú, que apresentam uma maior capacidade de adaptação. Os resultados sugerem que as sub-bacias do Moxotó são mais vulneráveis às mudanças climáticas, o que pode levar a uma escassez crescente de água no solo e uma maior necessidade de estratégias de manejo hídrico.

3. Impactos sobre a demanda hídrica: A análise das imagens Landsat permitiu observar as mudanças espaço-temporais ocorridas nos municípios que compõem a AID do Eixo Leste do PISF, em 1985, 2005 e 2023. As estimativas dos índices de vegetação, saldo de radiação e evapotranspiração, obtidas a partir do modelo SEBAL, apresentaram bom desempenho e se mostraram compatíveis com os resultados encontrados na literatura. Os resultados indicam que a cobertura vegetal no semiárido têm se degradado em decorrência de ações antrópicas, mudanças ambientais e climáticas. Por meio dos resultados de saldo de radiação (R_n) e da evapotranspiração (ET_d), foi possível identificar as áreas com déficit de evapotranspiração e avaliar a espacialização da resposta evaporativa na região, observando a heterogeneidade das respostas energéticas na AID. Essas variações evidenciam que a AID apresenta características diferenciadas no que tange ao saldo de radiação, o que, por sua vez, influencia a distribuição da evapotranspiração. Essa fragmentação das respostas energéticas revela a complexidade da região e ressalta a importância da gestão integrada e adaptativa. As análises indicam que o uso e a cobertura do solo desempenham papel crucial na sensibilidade das respostas de evapotranspiração, destacando a necessidade de estratégias de manejo que considerem a dinâmica local e regional para garantir a sustentabilidade dos recursos naturais.
4. Recomendações para o Manejo Hídrico: Os resultados indicam a necessidade de estratégias de manejo hídrico adaptadas às condições específicas das sub-bacias, especialmente nas áreas mais vulneráveis às mudanças climáticas. A promoção de técnicas de conservação da água, a gestão sustentável dos recursos e o planejamento agrícola baseado em análises detalhadas da umidade do solo e evapotranspiração serão essenciais para garantir a segurança hídrica e a produtividade agrícola na região semiárida, sobretudo visando o aumento da produtividade agrícola da agricultura de sequeiro e o melhor gerenciamento das áreas irrigadas.

Diante dessas observações, a integração do sensoriamento remoto com a modelagem hidrológica revelou-se uma abordagem essencial para compreender os efeitos das mudanças ambientais, climáticas e da dinâmica hídrica na AID do PISF. Essa combinação metodológica proporciona uma análise mais aprofundada de uma

região estratégica para o estado de Pernambuco, que tende a enfrentar desafios significativos e transformações substanciais no futuro próximo. A análise sistemática de dados hidrológicos gerados pelo modelo SUPer, associada às informações de cobertura vegetal, saldo de radiação e evapotranspiração derivadas do SEBAL, possibilitaram uma avaliação abrangente das alterações no ciclo hidrológico e dos impactos ambientais. Os resultados indicam que essas mudanças podem intensificar a escassez hídrica e ampliar as vulnerabilidades associadas à agricultura no semiárido. As condições de uso e cobertura do solo na Caatinga evidenciaram a redução da vegetação nativa, com retração de áreas vegetadas e aumento da exposição do solo. Paralelamente, as respostas energéticas e evaporativas também apresentaram variações significativas, com implicações diretas sobre a disponibilidade hídrica. Esse cenário sugere uma maior vulnerabilidade da agricultura de sequeiro, devido à redução da umidade do solo, e uma crescente demanda hídrica para a manutenção da produtividade agrícola em áreas irrigadas na AID. Esses fatores reforçam a necessidade de estratégias de gestão que integrem a conservação dos recursos naturais e a adaptação às mudanças climáticas para garantir a sustentabilidade hídrica e agrícola na região.

Este estudo representa uma contribuição relevante para a compreensão da dinâmica hídrica e agrícola na AID do PISF. Diante das projeções de expansão das áreas irrigadas, torna-se fundamental avaliar os impactos dessa ampliação sobre a demanda hídrica regional, especialmente no contexto das mudanças climáticas e da crescente competição pelo uso da água. A intensificação desses fatores pode agravar conflitos e desigualdades na distribuição dos recursos hídricos, o que demanda estratégias eficazes de gestão para garantir a sustentabilidade hídrica da região. Além disso, ressalta-se que a transposição do Rio São Francisco tem como uso prioritário o consumo humano, o que reforça a necessidade de políticas que equilibrem o desenvolvimento agrícola com a segurança hídrica e a preservação ambiental.

REFERÊNCIAS

- Allen, R. *et al.* **SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land)**. Advanced Training and Users Manual – Idaho Implementation, version 1.0, 2002.
- ALMEIDA, A. H. B.; ALMEIDA, H. S. A.; DE OLIVEIRA, M. K. T. Perspectivas da gestão hídrica no semiárido brasileiro para a irrigação. **Disciplinarum Scientia Naturais e Tecnológicas**, v. 22, n. 2, p. 119-132, 2021.
- ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (Brasil). **Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada**. 2. ed. Brasília: ANA, 2021.
- ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (Brasil). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2022: relatório pleno / Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico**. Brasília: ANA, 2022.
- ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (Brasil). **Uso da água na agricultura de sequeiro no Brasil (2013-2017)**. Agência Nacional de Águas, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Brasília: ANA, 2020.
- ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Sistema de Acompanhamento de Reservatórios** - Reservatórios do Nordeste. 2022. Disponível: neste endereço. Acesso: 11 out. 2022.
- ANA - Agência Nacional de Águas. **Outorga de direito de uso de recursos hídricos**. Brasília: SAG, 2011.
- APAC - Agência Pernambucana de Águas e Clima. **Relatório de situação de recursos hídricos do Estado de Pernambuco 2011/2012**. Recife: Apac, 2013.
- Aquino, J. R. de; Alves, M. O.; Vidal, M. de F. Agricultura familiar no nordeste: um breve panorama dos seus ativos produtivos e da sua importância regional. **Boletim Regional, Urbano e Ambiental - IPEA**, p. 97-110, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.38116/brua23art7>.
- Araújo Filho, J. C.; Marques, F. A.; Amaral, A. J.; Cunha, T. J. F.; Souza Júnior, V. S.; Galvão, P. V. M. Solos do Semiárido: características e estoque de carbono. *in*: Giongo, V.; Angelotti, F. **Agricultura de baixa emissão de carbono em regiões semiáridas: experiência brasileira**. Brasília, DF: Embrapa, 2022.
- Arnold, J. G.; Moriasi, D. N.; Gassman, P. W.; Abbaspour, K. C.; White M. J.; Srinivasan, R.; Santhi, C.; Harmel, R. D.; Van Griensve, A.; Van Liew, M. W.; Kannan, N.; Jha, M. K. SWAT: model use, calibration, and validation. **Trans. ASABE**, v. 55(4), p. 1491-1508, 2012. Doi: 10.13031/2013.42256.
- Arnold, J. G.; Srinivasan, R.; Muttiah, R. S.; Williams, J. R. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 34, n. 1, p. 73-89, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>.
- Aryalekshmi, B. N.; Biradar, R. C.; Chandrasekar, K.; Ahamed, J. M. Analysis of various surface energy balance models for evapotranspiration estimation using

satellite data. **The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science**, v. 24, n. 3, p. 1119-1126, 2021. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2021.11.007>.

Ashraf Vaghefi, S.; Mousavi, S. J.; Abbaspour, K. C.; Srinivasan, R.; Arnold, J. R. Integration of hydrologic and water allocation models in basin-scale water resources management considering crop pattern and climate change: Karkheh River Basin in Iran. **Regional environmental change**, 2015, 15: 475-484. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0573-9>.

Azevedo, J. A. De; Silva, E. M. da. **Tensiometro: dispositivo prático de controle da irrigação**. Planaltina: EMBRAPA Cerrados, 1999.

Barbosa, W. G. ; Carvalho, J. De M. ; Silva, D. H. L. Da ; Silva Júnior, A. N. Da ; Araújo, L. Da S. ; Silva, A. S. A. Da ; Ferreira, T. A. E. ; Cristino, C. T. ; Stosic, T. Seasonality of the rainfall regime in the mesoregions of the Pernambuco state, Brazil. **Research, Society and Development**, v. 12, n. 12, p. 1-13, 2023. Doi: [10.33448/rsd-v12i12.43835](https://doi.org/10.33448/rsd-v12i12.43835).

Barros, J. P. F. G., Bandim, C. G. A., Soares, G. A. S., Silva, J. N. B., Freitas, C. J. S., Moura, M. S. B., Galvêncio, J. D. Avaliação da cobertura vegetal de área beneficiada pelo Eixo Leste do Projeto de Integração do Rio São Francisco, utilizando ADIVA. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, v.13, n.3, 2023. Doi: <https://doi.org/10.29150/jhrs.v13.4.p512-524>.

Barros, J.; Bandim, C.; Soares, G.; Silveira, N.; Moura, M.; Galvêncio, J. Assessment of Water Balance Scenarios Before and After the Construction of the Eastern Axis of the Transposition São Francisco River, Brazil. *in*: France SWAT Conference, 2024, Strasbourg. (**Anais**), Strasbourg: SWAT Conference, 2024

Mady, B.; Lehmann, P.; Gorelick, S. M.; O, D.. Distribution of small seasonal reservoirs in semi-arid regions and associated evaporative losses. **Environmental Research Communications**, v. 2, n. 6, p. 061002, 2020. Doi: [10.1088/2515-7620/ab92af](https://doi.org/10.1088/2515-7620/ab92af).

Bassoi, L. H. Bassoi, L. H.; Teixeira, A. H. De C.; Braga, M. B.; Simoes, W. L.; Calgaro, M.; Pinto, J. M. Uso da água em agricultura irrigada no semiárido brasileiro *in*: Sa, I. B.; Silva, P. C. G. da. **Semiárido brasileiro: pesquisa, desenvolvimento e inovação**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2010.

Bastiaanssen, W. G. M.; Pelgrum, H.; Wang, J.; Ma, Y.; Moreno, J. F.; Roerink, G. J.; Van Der Wal, T. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL).: Part 2: Validation. **Journal of hydrology**, v. 212, p. 213-229, 1998. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00254-6](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00254-6).

Bezerra, B. G.; Silva, B. B. Da; Santos, C. A. C. Dos; Bezerra, J. R. C. Actual evapotranspiration estimation using remote sensing: comparison of SEBAL and SSEB approaches. **Advances in Remote Sensing**, v. 4, n. 3, 2015. Doi: <http://dx.doi.org/10.4236/ars.2015.43019>.

Bezerra, H. N.; Bezerra, J. M.; Rêgo, A. T. A. do. Estimativa da evapotranspiração real diária no semiárido brasileiro utilizando sensoriamento remoto. **Revista Tecnologia e Sociedade**, 2021, 17.47: 183-201. DOI: <http://dx.doi.org/10.3895/rts.v17n47.12633>.

Boegh, E.; Soegaard, H.; Broge, N.; Hasager, C. B.; Jensen, N. O.; Schelde, K.; Thomsen, A. Airborne multispectral data for quantifying leaf area index, nitrogen concentration, and photosynthetic efficiency in agriculture. **Remote sensing of Environment**, v. 81, n. 2-3, p.179-193, 2002. Doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00342-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00342-X).

Bonetti, S.; Sutanudjaja, E. H.; Mabhaudhi, T.; Slotow, R.; Dalin, C. Climate change impacts on water sustainability of South African crop production. **Environmental Research Letters**. v. 17, n. 8, p. 084-017, 2022. Doi: 10.1088/1748-9326/ac80cf.

Boratto, I. M. P.; Gomide, R. L. Espacialização dos componentes do balanço de energia e de evapotranspiração na região Norte de Minas Gerais, utilizando o modelo SEBAL e imagens orbitais Landsat 5 TM. *in*: XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR. **Anais**. Foz do Iguaçu: INPE, 2013. p. 6284 - 6291.

Boratto, I. M. De P.; Gomide, R. L. Espacialização dos componentes do balanço de energia e de evapotranspiração na região Norte de Minas Gerais, utilizando o modelo SEBAL e imagens orbitais Landsat 5 TM. *In*: XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (**Anais**), Foz do Iguaçu: INPE, 2013.

Braga, M. B.; Guedes, I. M. R.; Silva, J. Da; Lima, C. E. P. **Determinação simplificada da umidade do solo visando o manejo de irrigação em Hortaliças**. Brasília, DF: Embrapa Hortaliças, 2018 (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 155).

BRANCO, O. E. de A. Avaliação da disponibilidade hídrica: Conceitos e aplicabilidade. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, 2006.

Brasil. **Decreto nº 24.643 de 10 de julho de 1934**. DECRETA O CÓDIGO DE ÁGUAS. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 1934.

Brasil. **LEI Nº 12.787, DE 11 DE JANEIRO DE 2013**. Dispõe sobre a Política Nacional de Irrigação. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 2013.

Brasil. **Lei nº 9.433 de 08 de janeiro de 1997**. Institui A Política Nacional De Recursos Hídricos, Cria O Sistema Nacional De Gerenciamento De Recursos Hídricos. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 1997.

Brasil. Ministério da Ciência e Tecnologia e Inovação. Instituto Nacional do Semiárido. **Sinopse do Censo Demográfico Para o Semiárido Brasileiro**. Campina Grande: MCTI; Insa, 2012. p.13.

Brasil. Ministério da Integração Nacional. **Projeto de integração do Rio São Francisco com bacias hidrográficas do Nordeste Setentrional**: projeto básico ambiental (PBA) – relatório semestral de execução 01, 2007.

Braun, P.; Maurer, B.; Müller, G.; Gross, P.; Heinemann, G.; Simmer, C. An integrated approach for the determination of regionale vapotranspiration using mesoscale modelling, remote sensing and boundary layer measurements. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 76, p. 83-105, 2001. Doi: <https://doi.org/10.1007/s007030170041>.

Bressiani, D.; Srinivasan, R.; Queiroga De Miranda, R.; Galvinctio, J. D.; Montenegro, S. M. G. L.; Mendiondo, E. M. An open collaborative web-based Brazilian Ecohydrological Simulation tool – BEST. *in*: Simpósio Brasileiro De Recursos Hídricos, XXV , 2023, Sergipe. **Anais**. Sergipe: ABRHidro. p. 1-7, 2023.

Campos, V. N. De O.; Fracalanza, A. P. Governança das águas no Brasil: conflitos pela apropriação da água e a busca da integração como consenso. **Ambiente & sociedade**, v. 13, n. 3, p. 365-382, 2010.

Carvalho, A. J. B.; Santos, J. A.; Junior, W. L. C.; Aprígio, A. C. C.; Oliveira, G. S.; Martins, G. S. Estimativa de umidade do solo utilizando diferentes metodologias. In: ANDRADE, Jaily Kerller Batista (Org.). **Estudos em Ciências Ambientais e Agrárias**. Campina Grande: Licuri, p. 48-59, 2023. Doi: 10.58203/Licuri.20965.

Castellanos, E., M.F. Lemos, L. Astigarraga, N. Chacón, N. Cuví, C. Huggel, L. Miranda, M. Moncassim Vale, J.P. Ometto, P.L. Peri, J.C. Postigo, L. Ramajo, L. Roco, and M. Rusticucci, 2022: Central and South America. In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 1689–1816, DOI:10.1017/9781009325844.014.

Castro, C. N. de (Org.). **Água, problemas complexos e o Plano Nacional de Segurança Hídrica**. 1. ed. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea), 2022. ISBN 9786556350318. DOI: <http://dx.doi.org/10.38116/9786556350318>.

Castro, C. N. de. Sobre a agricultura irrigada no semiárido: uma análise histórica e atual de diferentes opções de política. **Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada**. Brasília: Rio de Janeiro, 2018.

Castro, C. N. De; Cerezini, M. T. Impactos ambientais do projeto de integração do rio São Francisco sobre a área de influência. *in*: CASTRO, César Nunes de; CEREZINI, Monise Terra. **Transposição do São Francisco: território, potenciais impactos e políticas públicas complementares**. Brasília, DF: Ipea, 2023. Doi: <http://dx.doi.org/10.38116/978-65-5635-056-1>.

Castro, C. N. **Plano Nacional de Segurança Hídrica, problemas complexos e participação social**. Tese (Doutorado em Gestão Ambiental e Territorial) – Departamento de Geografia, Universidade de Brasília, Brasília, 2021.

Castro, César Nunes de. **Capacidade adaptativa às mudanças climáticas de agricultores familiares no semiárido brasileiro**. Rio de Janeiro : Ipea, maio 2024. (Texto para Discussão, n. 2999). DOI: <http://dx.doi.org/10.38116/td2999-port>

Censo agropecuário 2017. Rio de Janeiro: IBGE, 2019.

Chagas, A. M. S., de Assunção Montenegro, A. A., Lins, F. A. C., & de Andrade Farias, C. W. L. (2022). Análise da umidade do solo em bacia experimental no

semiárido pernambucano utilizando o modelo SWAT. *Agrometeoros.*, v. 30 DOI: <http://dx.doi.org/10.31062/agrom.v30.e026993>

Chatterjee, S.; Desai, A. R.; Zhu, J.; Townsend, P. A.; Huang, J. Soil moisture as an essential component for delineating and forecasting agricultural rather than meteorological drought. **Remote Sensing of Environment**, v. 269, p. 112833, 2022. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112833>.

CIVIL, Casa. **LEI Nº 11.947, DE 16 DE JUNHO DE 2009**. Caderno de Legislação, 2009.

Coelho Filho, M. A.; Pereira, F. A. C.; Angelocci, L. R.; Coelho, E. F.; Oliveira, G. X. S. O processo de evapotranspiração. in: Sousa, V. F.; Marouelli, W. A.; Coelho, E. F.; Pinto, J. M.; Filho, M. A. C. **Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2011.

Coelho, M. R.; Santos, H. G.; Silva, E. F.; Aglio, M. L. D. O recurso natural solo. in: Manzatto, C. V.; Freitas Jr., E.; Peres, J. R. R. **Uso agrícola dos solos brasileiros**. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, p. 1-11, 2002.

Costa, B. R. S.; Santos, L. M.; Bassoi, L. H. Calibração do sensor de capacitância IRRIGAP® para a medida da umidade em solo do Semiárido. in: Congresso Brasileiro De Engenharia Agrícola (**Anais**). Fortaleza: SBEA, 2013.

Crago, R. D. Conservation and variability of the evaporative fraction during the daytime. **Journal of Hydrology**, v. 180, n. 1–4, p.173-194, 1996. Doi: [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02903-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02903-6).

Cunha, G. R. Da; Santi, A.; Pasinato, A.; Dalmago, G. A.; Pires, J. L. F.; Gouvea, J. A. de. Gestão da produtividade da água em agricultura: o desafio de elevar o rendimento dos cultivos em ambientes com restrição hídrica. **Revista Plantio Direto**, v. 24, n. 144, p. 27-31, 2014.

Luz, G. G.; Galvinctio, J. D. Balanço de radiação com imagens captadas com Drones. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v. 15, n. 02, p. 1169-1179, 2022.

Silva, B. B.; Lopes, G. M.; De Azevedo, P. V. Balanço de radiação em áreas irrigadas utilizando imagens Landsat 5-TM. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 20, n. 2, p. 243-252, 2005.

Silva, L. C., Silva, J. L. B., Moura, G. B. A., Silva, D. A. O, Lopes, P. M. O., Nascimento, C. R., Batista, P. H. D. Índices biofísicos e o saldo de radiação à superfície via sensoriamento remoto no Semiárido Pernambucano. **Journal of Environmental Analysis and Progres**. v. 06, n. 01, p. 012-023, 2021. DOI: [10.24221/jeap.6.1.2021.2876.012-023](https://doi.org/10.24221/jeap.6.1.2021.2876.012-023).

Teixeira, A. H. C.; Bastiaanssen, W. G. M.; Ahmad, M. D.; Moura, M. S. B.; Bos, M. G. Analysis of energy fluxes and vegetation-atmosphere parameters in irrigated and natural ecosystems of semi-arid Brazil. **Journal of Hydrology**. v. 362, n. 1-2, p. 110-127, 2008. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.08.011>.

FAO - Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura. **Coping with water scarcity: an action framework for agriculture and food security**. Rome: FAO, 2012.

Fechine, J. A. L.; Galvêncio, J. D. Uma forma de convivência com a seca: bacia hidrográfica do Rio Brígida-Pernambuco-Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 7, n. 4, p. 724-730, 2014.

Ferrarini, A. S. F.; Ferreira Filho, J. B. De S.; Cuadra, S. V.; Victoria, D. DE C. Water demand prospects for irrigation in the São Francisco River: Brazilian public policy. **Water Policy**, v. 22, e. 3, p. 449-467, 2020. Doi: <https://doi.org/10.2166/wp.2020.215>.

Ferreira, P. S.; Gomes, V. P.; Galvêncio, J. D.; Santos, A. M.; Souza, W. M. Avaliação da tendência espaço-temporal da precipitação pluviométrica em uma região semiárida do estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 21, 2017.

França, L. M. de A. **Análise de uma bacia hidrográfica em área semiárida: relações entre seca, agricultura e os objetivos para o desenvolvimento sustentável**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, CFCH. Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Recife, 2021.

Franca, M. V.; Medeiros, R. M.; Holanda, R. M.; Saboya, L. M. F.; Rolim Neto, F. C.; Pereira, M. L. F.; Araújo, W. R. Balanço hídrico atual e futuro para a cultura do algodão em amparo de São Francisco, SE. **Revista Científica Multidisciplinar**, v. 2, n. 5, 2021. Doi: <https://doi.org/10.47820/recima21.v2i5.311>.

Francisco, P. R. M.; Chaves, I. B.; Chaves, L. H. G.; Lima, E. R. V. Detecção de Mudança da Vegetação de Caatinga. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.05, n.06, p. 1473-1487, 2012. Doi: doi.org/10.26848/rbgf.v5i6.232834.

Freire-Silva, J.; Vieira Dos Reis, J.; Oliveira Dos Santos, T.; Dos Santos Ferreira, H.; Vilas Boas Ramos Leitão, M. De M.; Galvêncio, J. D.; Candeias, A. L. Ação automáticos GEE-SEBAL edo Sistema de Unidades de Resposta Hidrológica para Pernambuco (SUPer) para regiões hídricas de Serra Talhada no estado de Pernambuco. **Geografia Ensino & Pesquisa**, v. 26, n. 33, p. 1-20, 2022. Doi: <https://doi.org/10.5902/2236499468044>.

Freitas, C. J. S.; Rocha, G. G.; Bandim, C. G. A.; Soares, G. A. S.; Barros, J. P. F. G.; Santana, S. H. C.; Galvêncio, J. D. Application of remote sensing and UAV aerial survey techniques for water resources management in irrigated areas of the São Francisco River integration project in the municipality of Terra Nova-PE. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, v.13, n.5, 2023.

Galvêncio, J. D., Miranda, R. Q., Moura, M. S., Montenegro, S. M. G. ADIVA-Análise de Índice de Vegetação e Água. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 15, n. 03, p. 1654-1659, 2022. Doi: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.3.p1654-1659>.

Galvêncio, J. D.; Miranda, R. Q.; Luz, G. G. Use of Soil Moisture as an Indicator of Climate Change in the SUPer System. **Hydrology**, v. 11, n. 5, p. 65, 2024. Doi: <https://doi.org/10.3390/hydrology11050065>.

Galvínio, J. D.; Luz, G. G. Desenvolvimento de Modelo que Estima o Impacto do CO₂ Atmosférico nas Precipitações do Estado de Pernambuco, utilizando o ARIMA. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 04, p. 1840-1851, 2021. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.4.p1840-1851>

Gonçalves, M. J. S. Avaliação do impacto ambiental da redução de vazão na foz do rio São Francisco. *In*: SIMPÓSIO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO, 1., 2016, Juazeiro (**Anais**). Juazeiro: Comitê do Velho Chico; Fórum de Pesquisadores de Instituições de Ensino Superior da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, 2016.

Granados, A.; Sordo-Ward, A.; Paredes-Beltrán, B.; Garrote, L Exploring the role of reservoir storage in enhancing resilience to climate change in Southern Europe. **Water**, 2021, 13.1: 85. DOI: <https://doi.org/10.3390/w13010085>

Han, Q.; Zeng, Y.; Zhang, L.; Wang, C.; Prikaziuk, E.; Niu, Z.; Su, B. Global long term daily 1 km surface soil moisture dataset with physics informed machine learning. **Scientific Data**, v. 10, n. 1, p. 101, 2023. Doi: <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02011-7>.

Hoegh-Guldberg, O., D. Jacob, M. Taylor, M. Bindi, S. Brown, I. Camilloni, A. Diedhiou, R. Djalante, K.L. Ebi, F. Engelbrecht, J. Guiot, Y. Hijioka, S. Mehrotra, A. Payne, S.I. Seneviratne, A. Thomas, R. Warren, and G. Zhou, 2018: Impacts of 1.5°C Global Warming on Natural and Human Systems. *In*: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)], pp. 175–311. ISBN 978-1107671812 Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.

Huete, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote sensing of environment**, v. 25, n. 3, p. 295-309, 1988. Doi: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X).

Huete, A. R.; Warrick, A. W. Assessment of vegetation and soil water regimes in partial canopies with optical remotely sensed data. **Remote Sensing of Environment**, v. 32, n. 2-3, p. 155-167, 1990. Doi: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(90\)90015-E](https://doi.org/10.1016/0034-4257(90)90015-E).

Huete, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote sensing of environment**. v.25, n.3, p. 295-309, 1988. Doi: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X)

IBAMA. Ministério do Meio Ambiente. **PARECER Nº 031/2005 - COLIC/CGLIC/DILIQ/IBAMA**. Brasília-DF, 24 de mar. 2005.

Ide, A. K.; Da Silva, C. L. Demanda de água para irrigação das comunidades rurais associadas ao Projeto De Integração Do Rio São Francisco. **Revista Engenharia na**

Agricultura-REVENG, v. 25, n. 3, p. 249-260, 2017. DOI: <https://doi.org/10.13083/reveng.v25i3.748>.

IPCC. Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. **Aquecimento global de 1, 5° C**: sumário para formuladores de políticas. 2018.

IPCC. Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. **Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability**. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Cambridge, UK and New York, NY, USA, 2023. Doi: [doi:10.1017/9781009325844](https://doi.org/10.1017/9781009325844).

Lamichhane, P.; Miller, K. K.; Hadjikakou, M.; Bryan, B. A. Resilience of smallholder cropping to climatic variability. **Science of the total environment**, v. 719, p. 137464, 2020. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137464>.

Laurentino, M. L. S.; Silva, H. A.; Silva, J. C. B.; Santana, S. H. C.; Morais, Y. C. B.; Galvêncio, J. D. Aplicação dos índices de NDVI e EVI como análise da variação fisionômica da vegetação no Brejo de Altitude de Serra Negra-Bezerros/PE-Brasil. **XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 2011.

Leandro, V. B. S.; Bayma, G.; Bolfe, É. L. Dados de sensoriamento remoto na análise do uso e cobertura da terra do município de Caconde (SP). In: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 17., 2023, Campinas. **Anais**. Campinas: Embrapa, 2023. ISSN: 2965-2812.

Leite, M. J. H. Características gerais dos principais solos da região semiárida. **Revista Científica Multidisciplinar**, v. 3, n. 10, p. 1-20, out. 2022. DOI: <https://doi.org/10.47820/recima21.v3i10.1964>

Lima, C. E. S. de; Costa, V. S. de O.; Galvêncio, J. D.; Silva, R. M. da; Santos, C. A. G.. Assessment of automated evapotranspiration estimates obtained using the GP-SEBAL algorithm for dry forest vegetation (Caatinga) and agricultural areas in the Brazilian semiarid region. **Agricultural Water Management**, 2021, 250: 106863. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106863>.

Lima, M.F. **Cultura da Melancia**. Brasília: EMBRAPA Hortaliças, 2014.

Liu, X.; Liu, W.; Tang, Q.; Liu, B.; Wada, Y.; Yang, H. Global agricultural water scarcity assessment incorporating blue and green water availability under future climate change. **Earth's Future**, v. 10, n. 4, 2022.

Lopes, H. L.; Candeias, A. L. B.; Accioly, L. J. O.; Sobral, M. Do C. M.; PACHECO, A. P. Parâmetros biofísicos na detecção de mudanças na cobertura e uso do solo em bacias hidrográficas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, p. 1210-1219, 2010.

Lopes, J. R. F.; Dantas, M. P.; Ferreira, F. E. P. Identificação da influência da pluviometria no rendimento do milho no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 13, n. 5, p. 3610-3618, 2019. Doi: [10.7127/rbai.v13n5001119](https://doi.org/10.7127/rbai.v13n5001119).

Lopes, T. R.; Zolin, C. A.; Mingoti, R.; Vendrusculo, L. G.; Almeida, F. T.; Souza, A. P.; Oliveira, R. F.; Paulino, J.; Uliana, E. M. (2021). Hydrological regime, water availability and land use/land cover change impact on the water balance in a large agriculture basin in the Southern Brazilian Amazon. **Journal of South American Earth Sciences**, 108, 103224. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103224>.

LUZ, G. G.; GALVÍNCIO., J. D. Balanço hídrico superficial da bacia hidrográfica do riacho Milagres-PE, utilizando o SUPER. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v.15, n.02, p. 1094-1107, 2021. Doi: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.2.p1094-1107>.

Magrin, G.O., J.A. Marengo, J.-P. Boulanger, M.S. Buckeridge, E. Castellanos, G. Poveda, F.R. Scarano, and S. Vicuña, 2014: Central and South America. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Barros, V.R., C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 1499–1566. ISBN 9781107058163.

Maia, L. L. C. De L.; Oliveira, O. V. De; Bezerra, M. M. .; Grigolon, D.; Oliveira, F. R. De F. Impactos Socioeconômicos e gestão hídrica na Transposição do Rio São Francisco. **Boletim de Conjuntura (BOCA)**, Boa Vista, v. 17, n. 51, p. 550–571, 2024. DOI: 10.5281/zenodo.10963273.

Maia, A.; Gondim, R. S.; Castro, M. A. H. de. Sensibilidade da demanda de água para irrigação a mudanças climáticas e fatores operacionais dos sistemas de produção. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2016.

Marengo, J. A.; Alves, L. M.; Beserra, A. E.; Lacerda, F. F. Variabilidade e mudanças climáticas no semiárido brasileiro, *In*: MEDEIROS, S. S.; GHEYI, H. R.; GALVÃO, C. O.; PAZ, V. P. DA S. **Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas**, Campina Grande: INSA, p.383-422, 2011.

Marengo, J. A.; Cunha, A. P.; Alves, L. M. A seca de 2012-15 no semiárido do Nordeste do Brasil no contexto histórico. **Revista Climanalise**, v. 3, p. 49-54, 2016.

Marengo, J. A.; Cunha, A. P.; Soares, W. R.; Torres, R. R.; Alves, L. M.; Brito, S. S. B.; Cuartas, L. A.; Leal, K.; Neto, G. R.; Alvalá, R. C. S.; Magalhaes, A. R. Increase risk of drought in the semiarid lands of Northeast Brazil due to regional warming above 4°C. *In*: **Climate change risks in Brazil**. Cham: Springer. p. 181-200, 2018. Doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-92881-4_7.

Marengo, J. A.; Torres, R. R.; Alves, L. M. Seca no Nordeste do Brasil — passado, presente e futuro. *Theor Appl Climatol* 129 , 1189–1200 (2017). <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1840-8>

Markham, B. L.; Barker, J. L. Thematic Mapper Bandpass Solar Exoatmospherical Radiances. **International Journal of Remote Sensing**, n. 8, 517-523, 1987. Doi: <https://doi.org/10.1080/01431168708948658>.

Marques, A. C.; Veras, C. E.; Rodriguez, D. A. Assessment of water policies contributions for sustainable water resources management under climate change scenarios. **Journal of Hydrology**, v. 608, p. 127690, 2022. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127690>

Marques, A. C.; Veras, Ce.; Rodriguez, D. A. Avaliação das contribuições das políticas hídricas para a gestão sustentável dos recursos hídricos em cenários de mudanças climáticas. **Journal of Hydrology**, v. 608, p. 127690, 2022. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127690>.

Martins, A. P.; Galvani, E. Relação entre uso e cobertura da terra e parâmetros biofísicos no Cerrado Brasileiro. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 40, p. 148-162, 2020. Doi: <https://doi.org/10.11606/rdg.v40i0.167739>.

Medeiros, J. L. S.; Jesus, I. S.; Silva, T. J. R. D.; Nascimento, M. B.; Cezario, J. A.; Paiva, W.; Santos, L. L.; Campos, G. M.; Moitinho, E. B.; Fonseca, L. L. S.. Estimativa da evapotranspiração real utilizando geotecnologias na região do semiárido, Bahia, Brasil. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v.12, n.6, p.360-376, 2021. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.006.0030>

MI - Ministério da Integração Nacional. **Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional**. Relatório de Impacto Ambiental (RIMA). Brasília, 2004.

MI. Ministério da Integração Nacional. **Programa De Fornecimento De Água E Apoio Técnico Para Pequenas Atividades De Irrigação Ao Longo Dos Canais Para As Comunidades Agrícolas (PBA 16)**. Brasília, Revisão 2005.

MIDR. Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional - MIDR. **Mudança em sua vida**. Publicado em 05/08/2020. Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/seguranca-hidrica/projeto-sao-francisco/mudanca-em-sua-vida>. Acesso em: 09 de setembro de 2024.

Miranda, R. Q De. **Avaliação integrada da variação espacial e temporal do balanço hídrico na caatinga**. 2017. Tese (Doutorado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

Montenegro, A.; Ragab, R. Hydrological response of a Brazilian semi-arid catchment to different land use and climate change scenarios: a modelling study. **Hydrological Processes**, 2010, 24.19: 2705-2723.

Montenegro, Sg; Ragab, R.; Montenegro, A. Melhorando a gestão hídrica agrícola na região semiárida do Brasil: estudo experimental e de modelagem. **Irrigation Science**, v. 28, n. 4, p. 301–316, 29 set. 2009. Doi: <https://doi.org/10.1007/s00271-009-0191-y>.

Moura, M. S. B.; Galvncio, J. D.; Brito, L. T. L.; Souza, L. S. B.; Sá, I. I. S.; Silva, T. G. F., 2012. Clima e água de chuva no Semi-Árido: Potencialidades da água de chuva no Semi-Árido brasileiro. In: Brito, L. T. L.; Moura, M. S. B.; Gama, G. F. B. (editores Técnicos). **Potencialidades da água de chuva no Semi-Árido brasileiro**. Petrolina: EMBRAPA Semiárido, p. 37-58, 2012.

Moura, M.; Galvêncio, J.; Miranda, R.; Costa, V.; Souza, W.; Morellato, L. P.; Montenegro, S. Assessment of soil water availability and its relation to soil water content in the Caatinga Biome using hydrological modeling. *in*: France SWAT Conference, 2024, Strasbourg. (**Anais**), Strasbourg: SWAT Conference, 2024

Mwakalila, S.; Feyen, J.; Wyseure, G. The influence of physical catchment properties on baseflow in semi-arid environments. **Journal of Arid Environments**, 2002, 52.2: 245-258. DOI: <https://doi.org/10.1006/jare.2001.0947>.

Myeni, L.; Moeletsi, M. E.; Clulow, A. D. Present status of soil moisture estimation over the African continent. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 21, p. 14-24, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.11.004>.

Oliveira Dos Santos, T.; Tôrres Silveira, N.; Tibúrcio, I. M.; Galvêncio, J. D.; Pimentel, R. M. DE M. Detecção de fitoplâncton através do Índice de Área Foliar (IAF) e drone em um reservatório do semiárido. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 8, n. 3, 2023. Doi: <https://doi.org/10.24221/jeap.8.3.2023.5876.204-211>.

Olivera-Guerra, L.; Merlin, O.; Er-Raki, S. Irrigation retrieval from Landsat optical/thermal data integrated into a crop water balance model: A case study over winter wheat fields in a semi-arid region. **Remote Sensing of Environment**, v. 239, p. 111627, 2020.

ONU BRASIL. **Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil**. Nações Unidas Brasil. 2022.

Pandey, D. K.; Putrevu, D.; Misra, A. Large-scale soil moisture mapping using Earth observation data and its validation at selected agricultural sites over Indian region. *In*: **Agricultural Water Management**. Academic Press, p. 185-207, 2021.

Patriota, E. G.; Claudino, C. M. A.; Rabelo, V. H. Estimativa da variabilidade do saldo de radiação no município de são José do egito, pernambuco. *In*: VI Simpósio Brasileiro de Recursos Naturais do Semiárido, (**Anais**). Fortaleza, 2023

Paulson, C. A. The mathematical representation of wind speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer. **Journal of Applied Meteorology**, n. 9, n. 6, p. 857-861, 1970. Doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1970\)009%3C0857:TMROWS%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1970)009%3C0857:TMROWS%3E2.0.CO;2).

Peccatiello, A. F. O. Políticas públicas ambientais no Brasil: da administração dos recursos naturais (1930) à criação do Sistema Nacional de Unidades de Conservação (2000). **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, n. 24, p. 71-82, 2011. Doi: <http://dx.doi.org/10.5380/dma.v24i0.21542>.

Pereira Neto, M. C. Prospects of the construction of dam in semiarid brazilian and its implications in the region Seridó of the state of Rio Grande do Norte. **Sociedade & Natureza**, [S. l.], v. 29, n. 2, p. 285–294, 2017. DOI: 10.14393/SN-v29n2-2017-7

Pires, A. P. N. Estrutura e objetivos da transposição do rio São Francisco: versões de uma mesma história. **GEOUSP Espaço e Tempo (Online)**, São Paulo, Brasil, v. 23, n. 1, p. 182–197, 2019. DOI: 10.11606/issn.2179-0892.geousp.2019.122366.

PNUMA ONU. Transformando nosso mundo: A agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável. **Ambientalmente sustentável**, v. 25, n. 1, p. 171-190, 2018. Doi: <https://doi.org/10.17979/ams.2018.25.1.4655>.

Portuguez-Maurtua, M.; Arumi, J. L.; Lagos, O.; Stehr, A.; Arquíñigo, N. M. Filling Gaps in Daily Precipitation Series Using Regression and Machine Learning in Inter-Andean Watersheds. **Water**, v. 14, n. 11, p. 1799, 2022.

PROFILL - AlfaSigma. **Atualização do plano de recursos hídricos do Estado de Pernambuco – PERH/PE**. Nota técnica. 2020.

Querino, C. A. S., Lopes Júnior, J. M., & Moura, M. A. Balanço de Radiação no Bioma Caatinga no Semiárido Alagoano. **Revista Brasileira De Geografia Física**, v. 15, n. 6, p. 2715–2729, 2022. Doi: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.6.p2715-2729>

Rennó, C. D.; Soares, J. V. **Conceitos básicos de modelagem hidrológica**. 2003.

Robock, A. HYDROLOGY: Soil Moisture. Editor(s): James R. Holton. **Encyclopedia of Atmospheric Sciences**. p. 987-993, 2003. ISBN 9780122270901. Doi: <https://doi.org/10.1016/B0-12-227090-8/00169-X>.

Sabino, M.; Souza, A. P. de. Global Sensitivity of Penman–Monteith Reference Evapotranspiration to Climatic Variables in Mato Grosso, Brazil. **Earth**. v. 4, n. 3, p. 714-727, 2023. Doi: <https://doi.org/10.3390/earth4030038>

Santos, H. G. Dos; Jacomine, P. K. T.; Anjos, L. H. C. Dos; Oliveira, V. A. De; Lumberras, J. F.; Coelho, M. R.; Almeida, J. A. De; Araujo Filho, J. C. De; Oliveira, J. B. De; Cunha, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

Santos, L. L. dos. **GEESEBAL: uma ferramenta Google Earth Engine para estimativa de séries temporais de evapotranspiração**. 2020. 67 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Porto Alegre, 2020.

Santos, W. R. dos; Jardim, A. M. da R. F.; Souza, L. S. B. de; Souza, C. A. A. de; Moraes, J. E. F. de; Alves, C. P.; Araújo Júnior, G. do N.; Silva, M. J. da; Salvador, K. R. da S.; Silva, M. V. da; Morellato, L. P. C.; Silva, T. G. F. da. Can changes in land use in a semi-arid region of Brazil cause seasonal variation in energy partitioning and evapotranspiration?. **Journal of Environmental Management**. v. 367, p. 121-959, 2024. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121959>.

Saraiva, S. M. **Caracterização de Luvisolos, Neossolos Regolíticos e Planossolos ao longo de um gradiente pluviométrico no semiárido brasileiro**. Tese (Doutorado em Ciência do Solo), Centro de Ciências Agrárias. Universidade Federal da Paraíba, Areia, 2016.

Sass, K. S.; Konak, A.; Macedo, M. B.; Benso, M. R.; Shrimpton, E.; Balta-Ozkan, N.; Sarmah, T.; Mendiando, E. M.; Silva, G. J.; Silva, P. G. C.; Nardocci, A. C.; Jacobson, M. Enhancing Drought Resilience and Vulnerability Assessment in Small Farms: A Global Expert Survey on Multidimensional Indicators. **International**

Journal of Disaster Risk Reduction, v. 110, p. 104616, 2024. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2024.104616>.

Seneviratne, S. I.; Corti, T.; Davin, E. L.; Hirschi, M.; Jaeger, E. B.; Lehner, I.; Orlowsky, B.; Teuling, A. J. Investigating soil moisture–climate interactions in a changing climate: A review. **Earth-Science Reviews**, v. 99, n. 3-4, p. 125-161, 2010. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.02.004>.

Shah, E.; Liebrand, J.; Vos, J.; Veldwisch, G. J.; Boelens, R. The UN world water development report 2016, water and jobs: A critical review. **Development and Change**, v. 49, n. 2, p. 678-691, 2018.

Silva, B. B. Da.; Lopes, G. M.; Azevedo, P. V. Balanço de radiação em áreas irrigadas utilizando imagens Landsat 5 -TM. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.20, n.2, p. 243 -252, 2005.

Silva, J. L. B. de; Silva, M. V. da; Jardim, A. M. da R. F.; Lopes, P. M. O.; Oliveira, H. F. E. de; Silva, J. A. O. S.; Mesquita, M.; Carvalho, A. A. de; Bezerra, A. C.; Oliveira-Júnior, J. F. de; Ferreira, M. B.; Cavalcante, I. T. R.; Silva, E. F. da; Moura, G. B. de A. Geospatial Insights into Aridity Conditions: MODIS Products and GIS Modeling in Northeast Brazil. **Hydrology**. v. 11, n. 3, p. 32, 2024. Doi: <https://doi.org/10.3390/hydrology11030032>.

Silva, J. L. P. da; Silva Junior, F. B. da; Santos, J. P. A. de S.; Almeida, A. C. dos S.; Silva, T. G. F. da; Oliveira-Júnior, J. F. de; Araújo Júnior, G. do N.; Scheibel, C. H.; Silva, J. L. B. de; Lima, J. L. M. P. de; Silva, M. V. da. Semi-Arid to Arid Scenario Shift: Is the Cabrobó Desertification Nucleus Becoming Arid. **Remote Sensing**. v. 16, n. 15, p. 2834, 2024. Doi: <https://doi.org/10.3390/rs16152834>.

Silva, J. M.; Gurgel, I. G. D.; Santos, M. O.; Gurgel, A. M.; Augusto, L. G. S.; Costa, A. M. Conflitos ambientais e as águas do rio São Francisco. **Saúde e Sociedade**, v. 24, p. 1208-1216, 2015.

Silva, L. C.; Cunha, J. M.; Machado, N. G.; Campos, M. C. C.; Biudes, M. S. Estimativa do balanço de radiação por sensoriamento remoto de diferentes usos de solo no sudoeste da Amazônia brasileira. **Sociedade & Natureza**. v. 27, p. 341-356, 2015. Doi: <https://doi.org/10.1590/1982-451320150211>.

Silva, T. L. do V.; Guedes, R. V. de S. (2012). Análise do Comportamento Atmosférico em Situação de Seca: Uma Abordagem Operacional para Pernambuco (Analysis of Atmospheric Behavior Under Drought Condition: An Operational Approach to Pernambuco). **Revista Brasileira De Geografia Física**, 5(4), 937–950. Doi: <https://doi.org/10.26848/rbgef.v5i4.232880>.

Silva, T. R. B. F.; Santos, C. A. C.; Silva, D. J. F.; Santos, C. A. G.; Silva, R. M.; Brito, J. I. B. Climate indices-based analysis of rainfall spatiotemporal variability in Pernambuco State, Brazil. **Water**, v.14, n.14, p. 2190, 2022. Doi: <https://doi.org/10.3390/w14142190>.

Silveira, N. T.; Santos, T. O.; Tibúrcio, I. M.; Galvêncio, J. D. Aplicação do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) para a análise espaço-temporal da Bacia Hidrográfica do rio Terra Nova, Pernambuco, Brasil. **Revista Brasileira de**

Sensoriamento Remoto, v. 3, n3, 2022. Doi:
<https://doi.org/10.5281/zenodo.7510928>

Silveira, N. T.; Silveira, H. T.; Tibúrcio, I. M.; Galvêncio, J. D. Avaliação da qualidade da água do reservatório Nilo Coelho, Terra Nova, Pernambuco, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 15, n. 16, p. 2866-2877, 2022.

Soares, G. A. S. **Segurança hídrica no semiárido: análise sistêmica das características físicas e hidroclimáticas da bacia hidrográfica do Riacho Cachoeira, Serra Talhada/PE e percepções sobre a formação docente**. Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Filosofia e Ciências Humanas (Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação)), Universidade Federal de Pernambuco, 2022

Soares, R. B.; Campos, K. C. Uso e disponibilidade hídrica no semiárido do Brasil. **Revista de política agrícola**, v. 22, n. 3, p. 48-57, 2013.

Soares, R. B.; Campos, K. C. Uso e disponibilidade hídrica no semiárido do Brasil. **Revista de Política Agrícola**, v. 22, n. 3, p. 48-57, 2013.

Sobral, M. C. M. Estratégia de gestão dos recursos hídricos no Semiárido brasileiro. **REDE-Revista Eletrônica do PRODEMA**, v. 7, n. 2, 2011.

Sobral, M. C. S.; Assis, J. M. O.; Oliveira, C. R.; Silva, G. M. N.; Moraes, M.; Carvalho, R. M. C. Impacto das mudanças climáticas nos recursos hídricos no submédio da bacia hidrográfica do rio São Francisco–Brasil. **REDE-Revista Eletrônica do PRODEMA**, v. 12, n. 03, p. 95-106, 2018.

Sobrinho, T. A. **Regulação e gestão de recursos hídricos no Brasil** / Teodorico Alves Sobrinho (Organizador); Raquel de Faria Godoi Silva (Ilustradora). – Campo Grande: Oeste, 2023.

Soomro, A. G.; Babar, M. M.; Memon, A. H.; Zaidi, A. Z.; Ashraf, A.; Lund, J. Sensitivity of direct runoff to curve number using the SCS-CN method. **Civil Engineering Journal**, v. 5, n. 12, p. 2738-2746, 2019.

Souza, A. D. S. **Análise da participação dos agricultores familiares do Sertão do Pajeú–PE no Programa Nacional de Alimentação Escolar (PNAE)**. 2019. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciências Econômicas) – Unidade Acadêmica de Serra Talhada, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Serra Talhada, 2019.

Souza, C. M., Jr.; Shimbo, J. Z.; Rosa, M. R.; Parente, L. L.; Alencar, A. A.; Rudorff, B. F. T.; Hasenack, H.; Matsumoto, M.; Ferreira, L. G.; Souza-Filho, P. W. M.; De Oliveira, S. W.; Rocha, W. F.; Fonseca, A. V.; Marques, C. B.; Diniz, C. G.; Costa, D.; Monteiro, D.; Rosa, E. R.; Vélez-Martin, E.; Weber, E. J. 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, 2020.

Teixeira, P. C.; Donagemma, G. K.; Fontana, A.; Teixeira, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017.

Telles, T. S.; Vieira Filho, J. E. R.; Righetto, A. J.; Ribeiro, M. R. **Desenvolvimento da agricultura de baixo carbono no Brasil**. Texto para discussão / Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Brasília : Rio de Janeiro : Ipea , 1990. DOI: <http://dx.doi.org/10.38116/td2638>.

Tiburcio, I. M., Silveira, N. T., Dos Santos, T. O., Miranda, R. De Q., & Galvêncio, J. D. Balanço Hídrico e Mudanças Climáticas no Semiárido Pernambucano: aplicabilidade do Sistema de Unidades de Respostas Hidrológicas para Pernambuco (SUPer). **Revista Brasileira De Geografia Física**, v. 16, n. 3, p. 1657–1670, 2023. Doi: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v16.3.p1657-1670>.

Torres, F. S. M.; Pfaltzgraff, P. A. dos S. (org.). **Geodiversidade do estado de Pernambuco**. Recife: CPRM, p. 242, 2014.

Torres, L. A.; Campos, S. K. **Megatendências da Ciência do Solo 2030**. Brasília, DF: Embrapa, 2022.

Tundisi, J. G. Governança da água. **Revista da UFMG**, v. 20, n. 2, p. 222–235, 2016. Doi: 10.35699/2316-770X.2013.2698.

UN WATER. **Water Security & the Global Water Agenda A UN-Water Analytical Brief**. 2013.

UNESCO. World Water Assessment Programme . **Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2024**: Água para a prosperidade e a paz; resumo executivo. 2024.

UNESCO. World Water Assessment Programme. **The United Nations World Water Development Report 2023: partnerships and cooperation for water; facts, figures and action examples**. France: UN WATER, 2023.

Uniyal, B.; Dietrich, J.; Vasilakos, C.; Tzoraki, O. Evaluation of SWAT simulated soil moisture at catchment scale by field measurements and Landsat derived indices. **Agricultural Water Management**, v. 193, p.55-70, 2017. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.08.002>.

Viana, J. F. De S.; Miranda, R. De Q.; Farias, C. W. L. De A.; Lins, F. A. C.; Montenegro, S. M. G. L. **XV Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**. Calibrações parciais do Modelo SWAT como suporte ao Sistema de Unidades de Resposta Hidrológica para Pernambuco (SUPer): Bacia do Rio Pajeú. 2020.

Vivas, E.; Maia, R. A GESTÃO DE ESCASSEZ E SECAS ENQUADRANDO AS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS. **Revista Recursos Hídrico**, v. 31, n. 1, 2010.

Webb, E. K. Profile relationships: The log-linear range, and extension to strong stability. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 96, n. 407, p 67-90, 1970. Doi: <https://doi.org/10.1002/qj.49709640708>.