



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CARTOGRÁFICA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CARTOGRÁFICA E DE AGRIMENSURA

LUÍS AUGUSTO DE ARAÚJO SOARES

**USO DO SENSORIAMENTO REMOTO PARA O MAPEAMENTO DO IMPACTO
DAS CULTURAS IRRIGADAS NA VEGETAÇÃO NATIVA DO SERTÃO DO SÃO
FRANCISCO, PE**

Recife

2025

LUÍS AUGUSTO DE ARAÚJO SOARES

**USO DO SENSORIAMENTO REMOTO PARA O MAPEAMENTO DO IMPACTO
DAS CULTURAS IRRIGADAS NA VEGETAÇÃO NATIVA DO SERTÃO DO SÃO
FRANCISCO, PE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Cartográfica e de Agrimensura da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a Obtenção do título de bacharel em Engenharia Cartográfica e de Agrimensura.

Orientador(a): Dra. Prof.^a Ana Lúcia Bezerra Candeias

Recife

2025

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE**

Soares, Luís Augusto de Araújo.

Uso do sensoriamento remoto para o mapeamento do impacto das culturas irrigadas na vegetação nativa do sertão do São Francisco, PE / Luís Augusto de Araújo Soares. - Recife, 2025.

53 p. : il., tab.

Orientador(a): Ana Lúcia Bezerra Candeias

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Cartográfica e de Agrimensura - Bacharelado, 2025.

Inclui referências.

1. Sensoriamento remoto. 2. MapBiomas. 3. Caatinga. 4. Agricultura irrigada. 5. Landsat. I. Candeias, Ana Lúcia Bezerra. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

LUÍS AUGUSTO DE ARAÚJO SOARES

**USO DO SENSORIAMENTO REMOTO PARA O MAPEAMENTO DO IMPACTO
DAS CULTURAS IRRIGADAS NA VEGETAÇÃO NATIVA DO SERTÃO DO SÃO
FRANCISCO, PE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Cartográfica e de Agrimensura da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a Obtenção do título de bacharel em Engenharia Cartográfica e de Agrimensura.

Aprovado em: 11/08/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dra. Ana Lúcia Bezerra Candeias (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. João Rodrigues Tavares Junior (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Aos meus pais, por possibilitar que chegasse aqui.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus por todas as oportunidades e eventos oportunos que tive durante a minha caminhada até aqui.

À minha mãe, Tania, e ao meu pai, Sergio, por sempre me apoiarem e se sacrificarem para que eu pudesse ter a oportunidade de estudar. Sempre serei grato pelo apoio que me deram, pois, se cheguei até aqui, foi graças aos pais maravilhosos que tenho.

À minha querida irmã, Maria Júlia, por quem tenho um enorme carinho e que sempre amarei do fundo do meu coração. Aos meus familiares, que me apoiaram e torceram por mim ao longo dessa jornada.

À minha orientadora, Prof^a Dr^a Ana Lúcia, pelos conselhos, pela disponibilidade, paciência, por sempre compreender as dificuldades que encontrei e pelas aulas maravilhosas que me ajudaram a definir o caminho profissional que desejo seguir.

Aos meus amigos da escola, Alex, Caio e Williams, pelo apoio e pela amizade. Muito obrigado por sempre estarem ao meu lado — vocês têm um lugar especial no meu coração.

Aos amigos que conheci por meio do trabalho e que me incentivaram — Dinha, Erika, Erlandio, Felipe, Márcio, Mônica, Telma e Vanessa — agradeço pelo conhecimento e pelas experiências que me proporcionaram.

Aos amigos que conheci ao longo do curso — Clarelys, Rafael, Gilberto, Matheus e, em especial, aos integrantes do “QG”: Leonardo, Isaac, Eunnyce e Brenda — vocês mudaram a forma como eu via o mundo e me impulsionaram a crescer, tanto como profissional quanto como pessoa. Vocês têm a minha gratidão eterna.

RESUMO

A expansão da agricultura irrigada no semiárido brasileiro, especialmente no polo Petrolina-Juazeiro, tem impulsionado o desenvolvimento econômico, ao mesmo tempo em que provoca profundas transformações na paisagem e no bioma nativo da Caatinga. Este trabalho teve como objetivo geral analisar a evolução temporal do uso e ocupação do solo nos perímetros irrigados Bebedouro e Senador Nilo Coelho, em Petrolina-PE, entre os anos de 1985 e 2023, a fim de mapear o impacto das culturas irrigadas na vegetação nativa e no microclima local. Para isso, foram utilizadas técnicas de sensoriamento remoto, com dados da Coleção 9 da plataforma MapBiomass e imagens dos satélites Landsat 5 (sensor TM) e Landsat 8 (sensores OLI/TIRS). A metodologia envolveu o processamento de imagens e o cálculo da temperatura de superfície. Os resultados revelaram uma drástica alteração na cobertura do solo: a área ocupada por Formação Savântica (Caatinga) foi reduzida de 55,5% para 22,7% do total, enquanto as lavouras perenes expandiram de 2,9% para 43,5% no mesmo período. As áreas urbanizadas duplicaram, e as zonas de mosaico de uso agrícola e pecuário diminuíram, indicando uma intensificação e especialização da produção. A análise da temperatura de superfície demonstrou que as áreas irrigadas funcionam como "ilhas de frescor", apresentando temperaturas consideravelmente mais baixas que a vegetação de Caatinga circundante. Conclui-se que o avanço da fruticultura irrigada foi o principal vetor de transformação da paisagem, resultando na supressão da vegetação nativa e em alterações microclimáticas significativas, o que evidencia a importância do monitoramento contínuo para o planejamento e a gestão sustentável dos recursos naturais na região.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto, MapBiomass, Caatinga, agricultura irrigada, Landsat.

ABSTRACT

The expansion of irrigated agriculture in Brazil's semi-arid region, especially in the Petrolina–Juazeiro hub, has driven economic development while also causing profound transformations in the landscape and the native Caatinga biome. This study aimed to analyze the temporal evolution of land use and land cover in the Bebedouro and Senador Nilo Coelho irrigation perimeters, located in Petrolina–PE, between 1985 and 2023, in order to map the impact of irrigated crops on native vegetation and the local microclimate. To achieve this, remote sensing techniques were employed using data from Collection 9 of the MapBiomass platform and satellite imagery from Landsat 5 (TM sensor) and Landsat 8 (OLI/TIRS sensors). The methodology involved image processing and surface temperature calculation. The results revealed a drastic change in land cover: the area occupied by Savanna Formation (Caatinga) decreased from 55.5% to 22.7% of the total area, while perennial crops expanded from 2.9% to 43.5% during the same period. Urbanized areas doubled, and the mosaic zones of agricultural and pastoral use declined, indicating a trend toward production intensification and specialization. The surface temperature analysis showed that irrigated areas function as "cool islands," exhibiting significantly lower temperatures than the surrounding Caatinga vegetation. It is concluded that the expansion of irrigated fruit farming has been the main driver of landscape transformation, resulting in native vegetation suppression and significant microclimatic changes, highlighting the importance of continuous monitoring for sustainable planning and natural resource management in the region.

Keywords: Remote sensing, MapBiomass, Caatinga, irrigated agriculture, Landsat.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 — Ilustração do funcionamento de sensores passivos e ativos	16
Figura 2 — O Espectro Eletromagnético	16
Figura 3 — Missões do Landsat desde 1972	18
Figura 4 — Fluxograma metodológico	26
Figura 5 — Gráfico das principais espécies cultivadas nos perímetros irrigados Bebedouro e Nilo coelho em 2023	28
Figura 6 — Mapa de localização da área de estudo	28
Figura 7 — Mapa comparativo 1973 – 2025	29
Figura 8 — Mapa da série histórica de 1985 a 2023 do uso e ocupação do solo no perímetro irrigado Bebedouro	36
Figura 9 — Mapa da série histórica de 1985 a 2023 do uso e ocupação do solo no perímetro irrigado Nilo Coelho	38
Figura 10 — Mapa da série histórica de 1985 a 2023 do uso e ocupação do solo nos perímetros irrigados	40
Figura 11 — Mapa da série histórica de 1985 a 2023 da temperatura da superfície na área de estudo	41
Figura 12 — Histogramas da série histórica de 1985 a 2023 da temperatura da superfície	42
Figura 13 — Mapa com as seções de temperatura na região	43
Figura 14 — Mapa com da seção 1 de temperatura	44
Figura 15 — Mapa com da seção 1 de temperatura	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 — Características do satélite MSS Landsat 1	19
Tabela 2 — Características do satélite TM Landsat 5	19
Tabela 3 — Características do satélite OLI/TIRS Landsat 8	20
Tabela 4 — Características das imagens Landsat utilizadas	31
Tabela 5 — Coeficientes espectrais de calibração e irradiação espectral por banda	33
Tabela 6 — Coeficientes espectrais de calibração e irradiação espectral por banda	37
Tabela 7 — Coeficientes espectrais de calibração e irradiação espectral por banda	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CODEVASF	Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e Parnaíba
DN	Número Digital
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ERTS	<i>Earth Resources Technology Satellite</i>
GEE	<i>Google Earth Engine</i>
GTDN	Grupo de Trabalho para o Desenvolvimento do Nordeste
IAF	Índice de Área Foliar
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
LAI	<i>Leaf Area Index</i>
MIR	<i>Mid-Infrared</i>
MSS	<i>Multispectral Scanner</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
NIR	<i>Near-Infrared</i>
OLI	<i>Operational Land Imager</i>
PAN	Pancromática
RBV	<i>Return Beam Vidicon</i>
REM	Radiação Eletromagnética
SAVI	<i>Soil-Adjusted Vegetation Index</i>
SEBRAE	Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas
SIG	Sistemas de Informação Geográfica
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para a América do Sul
SUVALE	Superintendência do Vale do São Francisco
SWIR	<i>Shortwave Infrared</i>
TIRS	<i>Thermal Infrared Sensor</i>
TM	<i>Thematic Mapper</i>
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
UTM	<i>Universal Transverse Mercator</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	14
2.1	OBJETIVOS GERAIS	14
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3	REFERENCIAL TEÓRICO	15
3.1	SENSORIAMENTO REMOTO	15
3.2	GEOPROCESSAMENTO	17
3.3	PROGRAMA LANDSAT	18
3.3.1	LANDSAT 1	18
3.3.2	LANDSAT 5	19
3.3.3	LANDSAT 8	20
3.4	ÍNDICES ESPECTRAIS	21
3.4.1	NORMALIZED DIFFERENCE VEGETATION INDEX (NDVI)	21
3.4.2	SOIL-ADJUSTED VEGETATION INDEX (SAVI)	22
3.4.3	ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR (IAF)	23
3.5	PLATAFORMA MAPBIOMAS	24
4	METODOLOGIA	26
4.1	ÁREA DE ESTUDO	27
4.2	OBTENÇÃO DAS IMAGENS	30
4.3	PROCESSAMENTO DAS IMAGENS	31
4.3.1	LANDSAT 5	32
4.3.1.1	Calibração radiométrica	32
4.3.1.2	Reflectância	33
4.3.1.3	Cálculo dos índices de vegetação	34
4.3.1.4	Emissividade	34
4.3.1.5	Temperatura da superfície	34
4.3.2	LANDSAT 8	35
4.3.2.1	Calibração radiométrica	35
4.3.2.2	Temperatura da superfície	35
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
5.1	MAPBIOMAS	36
5.2	TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE	41
6	CONCLUSÃO	46
	REFERÊNCIAS	48

1 INTRODUÇÃO

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresenta uma aplicação teórica e prática do uso do sensoriamento remoto para o mapeamento do impacto das culturas irrigadas na vegetação nativa do sertão de Pernambuco. Foram aplicados conhecimentos de Sensoriamento Remoto, Processamento de Imagens, Cartografia Temática e Geografia Física Aplicada, que forneceram a base para o desenvolvimento do estudo. A seguir, apresenta-se a introdução ao tema e o enfoque adotado.

A região do Submédio do Vale do São Francisco, com destaque para o polo de desenvolvimento Petrolina-PE e Juazeiro-BA, consolidou-se nas últimas décadas como uma das mais importantes áreas de fruticultura irrigada do mundo. Inserida no semiárido brasileiro, uma região historicamente marcada por desafios climáticos e socioeconômicos, a implementação de perímetros de irrigação a partir da segunda metade do século XX, fomentada por órgãos como a Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e Parnaíba (CODEVASF), transformou radicalmente a economia e a paisagem local.

Este modelo de desenvolvimento, embora tenha gerado emprego, renda e projeção internacional para a produção agrícola brasileira, também impôs uma forte pressão sobre os recursos naturais, notadamente sobre o bioma Caatinga. A conversão de extensas áreas de vegetação nativa para dar lugar a monoculturas de uva e manga, entre outras, representa uma das mais significativas transformações de uso e ocupação do solo no Nordeste. Compreender a dimensão espacial e a evolução temporal desse processo é fundamental para avaliar seus impactos ambientais, que vão desde a perda de biodiversidade até alterações em variáveis microclimáticas, como a temperatura de superfície.

Nesse contexto, as geotecnologias, como o Sensoriamento Remoto e os Sistemas de Informação Geográfica (SIG), surgem como ferramentas indispensáveis. O programa Landsat, com seu acervo histórico de imagens desde 1972, oferece um registro contínuo e valioso das mudanças na superfície terrestre. Aliado a isso, iniciativas como o Projeto MapBiomas, que processa e disponibiliza dados anuais de uso e cobertura do solo para todo o Brasil com base em imagens Landsat,

democratizaram o acesso à informação e viabilizaram análises multitemporais robustas e consistentes.

Diante do exposto, este trabalho se propõe a investigar a dinâmica da transformação da paisagem no município de Petrolina-PE, focando nos perímetros irrigados Bebedouro e Senador Nilo Coelho. O objetivo geral é estudar o avanço das lavouras irrigadas entre 1985 e 2023, analisando como o uso do solo foi modificado e quais as consequências dessas mudanças para a vegetação nativa e para a temperatura da superfície na região.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral e os objetivos específicos serão apresentados nesta seção.

2.1 OBJETIVOS GERAIS

Estudar o avanço das lavouras irrigadas no município de Petrolina – PE, através da análise temporal utilizando imagens dos satélites da série Landsat, para obter dados de uso e ocupação do solo através do emprego de índices de vegetação e temperatura, aliados ao emprego de dados da plataforma MapBiomass, para analisar como o uso do solo foi modificado ao longo dos anos e as consequências dessas mudanças na região.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar a evolução temporal da ocupação do solo utilizando as imagens da série Landsat e a base do MapBiomass;
- Calcular a temperatura da superfície através das imagens do Landsat 5 e 8 para avaliar os resultados obtidos;
- Comparar os resultados ao longo da série para checar se há algum tipo de relação entre as mudanças no uso e ocupação do solo com as mudanças notadas.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 SENSORIAMENTO REMOTO

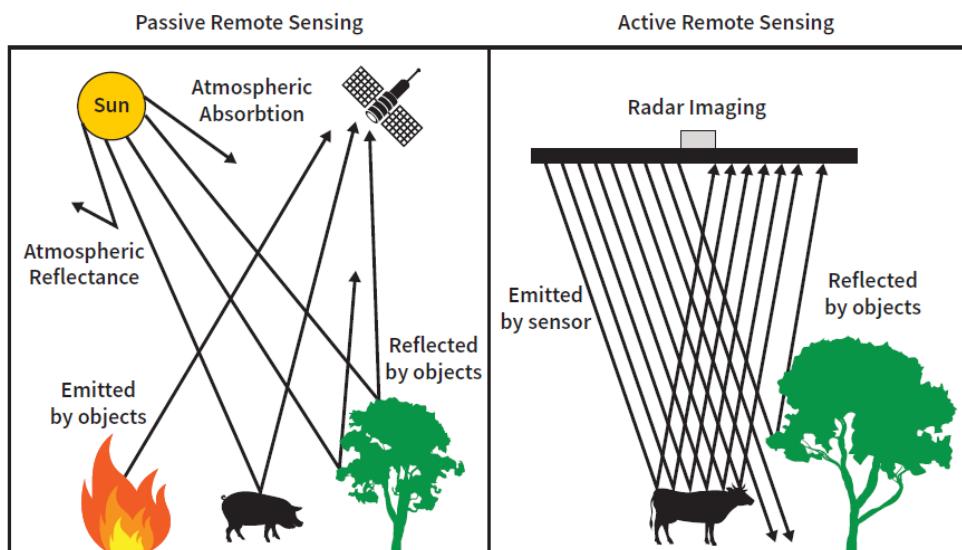
O Sensoriamento Remoto é uma tecnologia que de acordo com Elachi e Zyl (2006), permite a obtenção de dados da superfície terrestre sem que haja a necessidade de contato entre o objeto e o sensor. Através do uso de sensores instalados em satélites que orbitam o planeta em uma trajetória conhecida que captam a energia refletida ou emitida por objetos na superfície, permitindo o imageamento contínuo da superfície do planeta.

Segundo Florenzano (2011), "A origem do sensoriamento remoto vincula-se ao surgimento da fotografia aérea. Assim, a história do Sensoriamento Remoto pode ser dividida em dois períodos: um, de 1860 a 1960, baseado no uso de fotografias aéreas, e outro, de 1960 aos dias de hoje". Com a evolução desta área do conhecimento estando diretamente ligada às guerras, já que desde a guerra civil americana imagens aéreas eram capturadas para fins de reconhecimento do campo de batalha, com o desenvolvimento de técnicas e da tecnologia empregada sendo impulsionada por conflitos.

O termo Sensoriamento Remoto, foi cunhado em 1960 por Evelyn L. Pruitt (MENESES *et al.*, 2012), marcando o início da utilização de imagens capturadas por satélites na órbita terrestre, como o Mercury, Gemini e Apolo (FLORENZANO, 2011), que serviram como aprendizado para o desenvolvimento de satélites mais avançados e que usamos até hoje, como os aparelhos da série Landsat, cujas imagens serão utilizadas neste trabalho.

Podemos dividir os sensores tipicamente embarcados nos satélites em dois tipos: sensores ativos e sensores passivos, este último analisa a radiação eletromagnética (REM) emitida pelo Sol que é refletida pelos objetos da superfície para formar imagens, enquanto que o primeiro emite a própria radiação eletromagnética, o que reduz os efeitos de sombras e a reflectância difusora por conta da forma do objeto (ANDERSEN *et al.* 2006).

Figura 1 — Ilustração do funcionamento de sensores passivos e ativos.

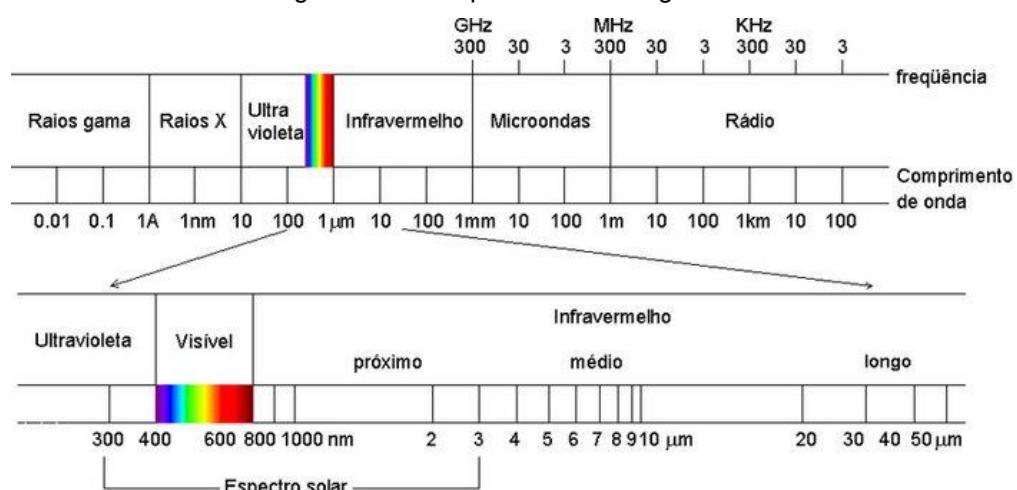


Fonte: Secretaria de Patrimônio da União (2017).

A REM captada passa por uma abertura no sensor e é direcionada aos "detetores", que absorvem a radiação (NOVO; PONZONI, 2001), tornando possível quantificar a energia refletida por um objeto na superfície, chamada de Radiância.

A Radiância medida é então dividida em intervalos específicos de comprimento de onda (Figura 2), com cada intervalo sendo determinado com base na forma com que as radiações são produzidas ou detectadas. Com cada banda possibilitando uma aplicação específica para estudos da superfície terrestre.

Figura 2 — O Espectro Eletromagnético.



Fonte: Steffen.

Os sensores dos satélites, como o Landsat, extraem informações dessas bandas através de detectores especializados que medem a intensidade da radiação refletida ou emitida em cada faixa espectral. Esses dados são então processados para criar imagens multiespectrais, permitindo a análise detalhada de características ambientais. Por meio da combinação de diferentes bandas, é possível realçar determinadas características, como a presença de água, vegetação ou áreas urbanas, facilitando o monitoramento e a gestão de recursos naturais.

3.2 GEOPROCESSAMENTO

O Geoprocessamento pode ser definido como um campo multidisciplinar que integra um conjunto de tecnologias voltadas para a coleta, o armazenamento, o tratamento, a análise e a exibição de informações georreferenciadas, ou seja, dados que possuem uma localização geográfica explícita na superfície terrestre. De acordo com Silva *et al.* (2013), "O Geoprocessamento utiliza técnicas matemáticas e procedimentos computacionais para tratar as informações espacial e temporal", sendo uma ferramenta indispensável para a manipulação de dados geográficos.

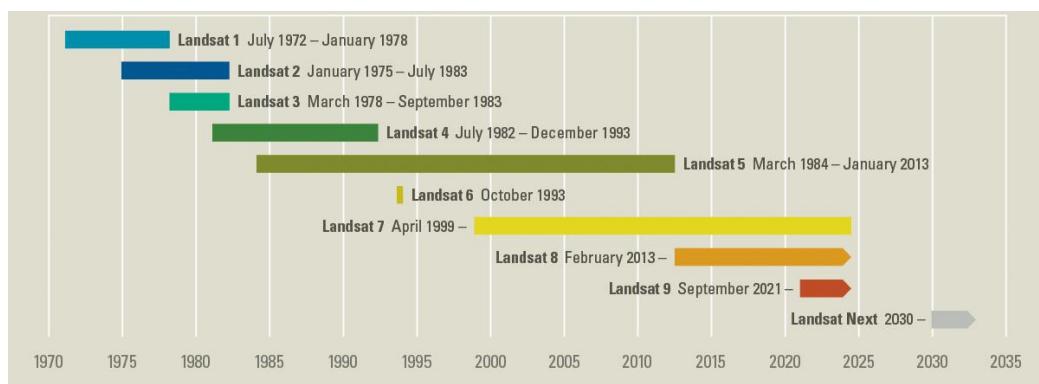
O emprego das técnicas de geoprocessamento é feito empregando *softwares* computacionais, conhecidos como Sistemas de Informação Geográficas (SIG), como QGis e ArcGIS, que podem ser definidos como programas utilizados para inserir, manipular, transformar, visualizar, modelar e exportar informações espaciais (BONHAM-CARTER, 1994), permitindo a análise mais profunda dos dados, mesclando informações de diversas fontes e criando bancos de dados georreferenciados (BERNINI; OLIVEIRA; MORET, 2007).

O QGIS é um *software* livre de código aberto fundado por Gary e Sherman, no ano de 2002 (MALIQI; PENEV; KELMENDI, 2017). Por se tratar de um *software* livre, o QGis é bastante utilizado para as mais variadas aplicações do geoprocessamento, oferecendo um conjunto robusto de ferramentas como modeladores matemáticos que atuam no cálculo das radiâncias e das reflectâncias, além de disponibilizar um compositor de impressões para a produção de mapas temáticos.

3.3 PROGRAMA LANDSAT

A série Landsat é um dos principais programas de imageamento contínuo da superfície terrestre e teve início em 1972, quando foi lançado ao espaço pela Agência Espacial Americana (NASA), o *Earth Resources Technology Satellite* (ERTS-1), que a partir de 1975 ficou conhecido como Landsat-1 (EMBRAPA, 2013). O programa Landsat foi desenvolvido pela NASA, com a operação do satélite, armazenamento e distribuição das imagens ficando a cargo do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS). Desde o lançamento do primeiro satélite em 1972, o programa Landsat está continuamente adquirindo imagens espaciais da superfície terrestre (USGS, 2025).

Figura 3 — Missões do Landsat desde 1972.



Fonte: USGS (2025).

3.3.1 LANDSAT 1

O satélite Landsat 1, originalmente denominado ERTS-1 (Earth Resources Technology Satellite), foi lançado em 23 de julho de 1972 e marcou o início do programa Landsat. Estava equipado com dois sensores: o Multispectral Scanner (MSS) e o Return Beam Vidicon (RBV), embora o MSS tenha sido o principal sensor utilizado cientificamente (CHUVIECO, 2016).

O MSS possuía quatro bandas espectrais, cobrindo o espectro visível e o infravermelho próximo, com resolução espacial de 79 metros e revisita de 18 dias, conforme o quadro abaixo. Sua capacidade de captar grandes áreas com imagens multiespectrais tornou-se um marco na observação da Terra, permitindo análises iniciais de vegetação, água e uso da terra (CAMPOS; RAMOS, 2017).

Tabela 1 — Características do satélite MSS Landsat 1.

Banda	Resoluções	
	Espectral (μm)	Espacial (m)
B4 (Verde)	0,50 – 0,60	79
B5 (Vermelho)	0,60 – 0,70	79
B6 (NIR)	0,70 – 0,80	79
B7 (MIR)	0,80 – 1,10	79

Fonte: Adaptado de Embrapa (2020).

3.3.2 LANDSAT 5

O satélite Landsat 5 foi lançado em 1º de março de 1984 e tornou-se o satélite de observação da Terra com maior tempo de operação da série, encerrando suas atividades em 2013. Foi equipado com dois sensores: o Thematic Mapper (TM) e o Multispectral Scanner (MSS), este último desativado em 1992.

O sensor TM ofereceu avanços significativos em relação ao MSS, sendo capaz de registrar as informações em 8 bits ou 256 níveis de cinza e com sete bandas espectrais, mostradas no quadro abaixo, cobrindo desde o azul até o infravermelho termal e revisita de 16 dias. Isso permitiu maior detalhamento e precisão nas análises ambientais e na detecção de mudanças ao longo do tempo (MOREIRA, 2011).

Tabela 2 — Características do satélite TM Landsat 5.

Banda	Resoluções	
	Espectral (μm)	Espacial (m)
B1 (Azul)	0,45 – 0,52	30
B2 (Verde)	0,52 – 0,60	30
B3 (Vermelho)	0,63 – 0,69	30
B4 (NIR)	0,76 – 0,90	30
B5 (MIR)	1,55 – 1,75	30
B6 (Termal)	10,40 – 12,50	120
B7 (SWIR)	2,08 – 2,35	30

Fonte: Adaptado de Embrapa (2020).

3.3.3 LANDSAT 8

O Landsat 8 foi lançado em 11 de fevereiro de 2013 e representa um dos satélites mais avançados da série. Possui dois sensores a bordo: o Operational Land Imager (OLI) e o Thermal Infrared Sensor (TIRS). O sensor OLI conta com nove bandas espectrais (incluindo a banda costal e a cirrus), com resolução espacial de 30 metros (15 m para a pancromática), enquanto o TIRS opera em duas bandas de infravermelho termal, com resolução de 100 metros (USGS, 2021).

Tabela 3 — Características do satélite OLI/TIRS Landsat 8.

Sensor	Banda	Resoluções	
		Espectral (μm)	Espacial (m)
OLI	B1 (Costal)	0,433 – 0,453	30
	B2 (Azul)	0,450 – 0,515	30
	B3 (Verde)	0,525 – 0,600	30
	B4 (Vermelho)	0,630 – 0,680	30
	B5 (NIR)	0,845 – 0,885	30
	B6 (SWIR 1)	1,560 – 1,660	30
	B7 (SWIR 2)	2,100 – 2,300	30
	B8 (PAN)	0,500 – 0,680	15
	B9 (Cirrus)	1,360 – 1,390	30
TIRS	B10 (Termal 1)	10,30 – 11,30	100
	B11 (Termal 2)	11,50 – 12,50	100

Fonte: Adaptado de Embrapa (2020).

As melhorias no Landsat 8 incluem maior sensibilidade radiométrica, com codificação de 12 bits o que lhe permite discernir 4096 níveis de energia, maior estabilidade orbital e qualidade geométrica, o que amplia seu uso em aplicações como monitoramento agrícola, recursos hídricos, mudanças de uso do solo e modelagem climática (EMBRAPA, 2017).

Outra grande evolução foi a mudança no sistema de varredura, com o OLI empregando uma tecnologia mais moderna chamada *push-broom*, que utiliza longos arranjos lineares de detectores estáticos para imagear toda a faixa da cena de uma

só vez, sem partes móveis, ao contrário do sistema de varredura mecânica *whisk-broom* empregado no Landsat 5. Este design resulta em maior tempo de permanência sobre cada pixel, o que melhora drasticamente a qualidade das imagens capturadas (NASA, 2025).

3.4 ÍNDICES ESPECTRAIS

Os índices espectrais são ferramentas utilizadas no sensoriamento remoto para destacar características específicas da superfície terrestre, como água, áreas urbanas e vegetação. Eles são obtidos a partir de combinações matemáticas entre bandas das imagens de satélite e facilitam a interpretação de fenômenos ambientais.

Entre esses índices, os índices de vegetação se destacam por sua capacidade de indicar a presença, densidade e vigor da cobertura vegetal. São especialmente úteis em regiões semiáridas, como o Sertão de Pernambuco, onde as mudanças na vegetação podem ocorrer de forma sutil e gradual.

Neste trabalho os índices de vegetação foram utilizados para avaliar os efeitos da agricultura irrigada sobre a vegetação nativa da Caatinga e para calcular a emissividade da superfície. Os principais índices utilizados foram o NDVI, o SAVI e o IAF, cada um com suas particularidades e vantagens. A seguir, são apresentadas suas definições e aplicações no contexto do estudo.

3.4.1 NORMALIZED DIFFERENCE VEGETATION INDEX (NDVI)

O NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) é um índice criado para ajudar a monitorar e compreender a condição da vegetação usando imagens captadas por satélites. Esse índice surgiu a partir de um estudo feito por Rouse e colaboradores (1974), que buscava avaliar áreas extensas, especialmente pastagens e regiões agrícolas, utilizando imagens do satélite ERTS-1, atualmente conhecido como Landsat 1.

Os pesquisadores perceberam que existia uma relação direta entre o comportamento da vegetação nas imagens de satélite e a quantidade de biomassa verde e umidade presentes nas plantas. Ao analisar as bandas espectrais do satélite, especificamente o infravermelho próximo (banda 7) e o vermelho (banda 5), eles

encontraram que a diferença entre essas duas bandas permitia estimar com boa precisão a presença e a condição das áreas vegetadas (ROUSE et al., 1974).

O NDVI é calculado utilizando a seguinte equação:

$$NDVI = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{RED})}{(\rho_{NIR} + \rho_{RED})} \quad (1)$$

Onde:

ρ_{NIR} : reflectância na banda do infravermelho próximo

ρ_{RED} : reflectância na banda do vermelho

Os valores obtidos pelo NDVI podem variar entre -1 e +1. Valores próximos a +1 indicam áreas com vegetação saudável e densa. Por outro lado, valores próximos de zero ou negativos indicam regiões sem vegetação, como solos expostos ou corpos d'água.

3.4.2 SOIL-ADJUSTED VEGETATION INDEX (SAVI)

O SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) é um índice espectral desenvolvido com o objetivo de reduzir a influência do solo nas análises da vegetação em imagens obtidas por sensoriamento remoto. Originalmente proposto por Huete em 1988, o SAVI busca corrigir uma limitação comum ao NDVI, que é a interferência causada por solos expostos ou pouco cobertos por vegetação, o que ocorre frequentemente em regiões semiáridas e áreas agrícolas em estágios iniciais de cultivo (Qi et al., 1994).

Qi e colaboradores (1994) explicam que o SAVI introduziu um fator de ajuste ao solo (L) diretamente na equação do NDVI, com a finalidade de compensar a interação espectral entre a vegetação e o solo subjacente. Esse fator, definido como L, varia tipicamente entre 0 e 1, sendo que o valor mais frequentemente adotado é 0,5, pois representa um equilíbrio para uma ampla faixa de condições de vegetação e solo.

A expressão do SAVI é dada por:

$$SAVI = \frac{(1 + L) \cdot (\rho_{NIR} - \rho_{RED})}{(L + \rho_{NIR} + \rho_{RED})} \quad (2)$$

Onde:

ρ_{NIR} : reflectância na banda do infravermelho próximo

ρ_{RED} : reflectância na banda do vermelho

L : fator de ajuste do solo, geralmente é adotado o valor de 0,5

Diferentemente do NDVI, o SAVI apresenta menor sensibilidade às variações causadas por diferentes tipos e condições do solo, permitindo análises mais precisas em regiões com vegetação esparsa, característica marcante do bioma da Caatinga e de outras áreas semiáridas. Isso torna o índice especialmente útil em estudos ambientais e agrícolas realizados nessas regiões, fornecendo resultados mais consistentes e confiáveis sobre a condição da vegetação (Qi et al., 1994).

3.4.3 ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR (IAF)

Diferentemente do NDVI e do SAVI, que são índices espectrais, o Índice de Área Foliar (IAF, ou LAI, do inglês *Leaf Area Index*) é um parâmetro biofísico fundamental que descreve a estrutura tridimensional do dossel vegetal, sendo definido como a razão entre a área total da superfície das folhas e a área da projeção perpendicular da copa sobre o solo (ASNER et al., 2003).

De acordo com Allen et al. (2007) esse índice pode ser calculado através da equação:

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

3.5 PLATAFORMA MAPBIOMAS

O MapBiomas é um projeto colaborativo lançado em 2015 por um consórcio de organizações civis, academia e setor privado, com o objetivo de mapear e monitorar a cobertura e uso do solo no Brasil ao longo de séries temporais, através de uma parceria com o *Google Earth Engine* que possibilitou o processamento de grandes quantidades de imagens da série Landsat. O projeto surgiu da necessidade de informações geoespaciais padronizadas e transparentes para subsidiar pesquisas, políticas públicas e práticas de gestão ambiental (RODRIGUES et al., 2019).

A metodologia do MapBiomas baseia-se em processamento automatizado de imagens Landsat, aplicação de algoritmos de aprendizado de máquina e validação em campo. Inicialmente, as imagens passam por etapas de pré-processamento, incluindo correção atmosférica, detecção e mascaramento de nuvens e sombras. Em seguida, são extraídas métricas espectrais, temporais e texturais para cada pixel ao longo da série histórica. A classificação é realizada por meio de algoritmos de Random Forest, treinados com amostras de referência definidas em zonas de interesse distribuídas por todo o território nacional. Os produtos classificatórios resultantes são posteriormente filtrados e validados por especialistas para garantir consistência e confiabilidade dos mapas (SOS MATA ATLÂNTICA & INPE, 2022).

A Coleção 9 do MapBiomas, lançada em 2024, é a mais recente atualização da série temporal, estendendo os dados de cobertura e uso da terra de 1985 até 2023. Essa versão incorpora aprimoramentos na metodologia de classificação, tais como integração de novas variáveis espectrais, melhoria nos algoritmos de filtragem de detecção de nuvens e adição de classes de uso do solo mais detalhadas, como infraestrutura urbana e corpos d'água permanentes. A Coleção 9 também apresenta maior acurácia geral, alcançando valores superiores a 85% em validações independentes, e amplia o acesso aos dados por meio de plataforma web interativa e repositórios de código aberto (CLEMENTE et al., 2023).

Inicialmente, na Coleção 1 — lançada em abril de 2016 — eram disponibilizados dados de uso e ocupação do solo categorizados em 7 classes, abrangendo o período de 2008 a 2015. Atualmente, a Coleção 9 é a mais recente, contendo 29 classes mapeadas entre os anos de 1985 e 2023 (MAPBIOMAS, 2024).

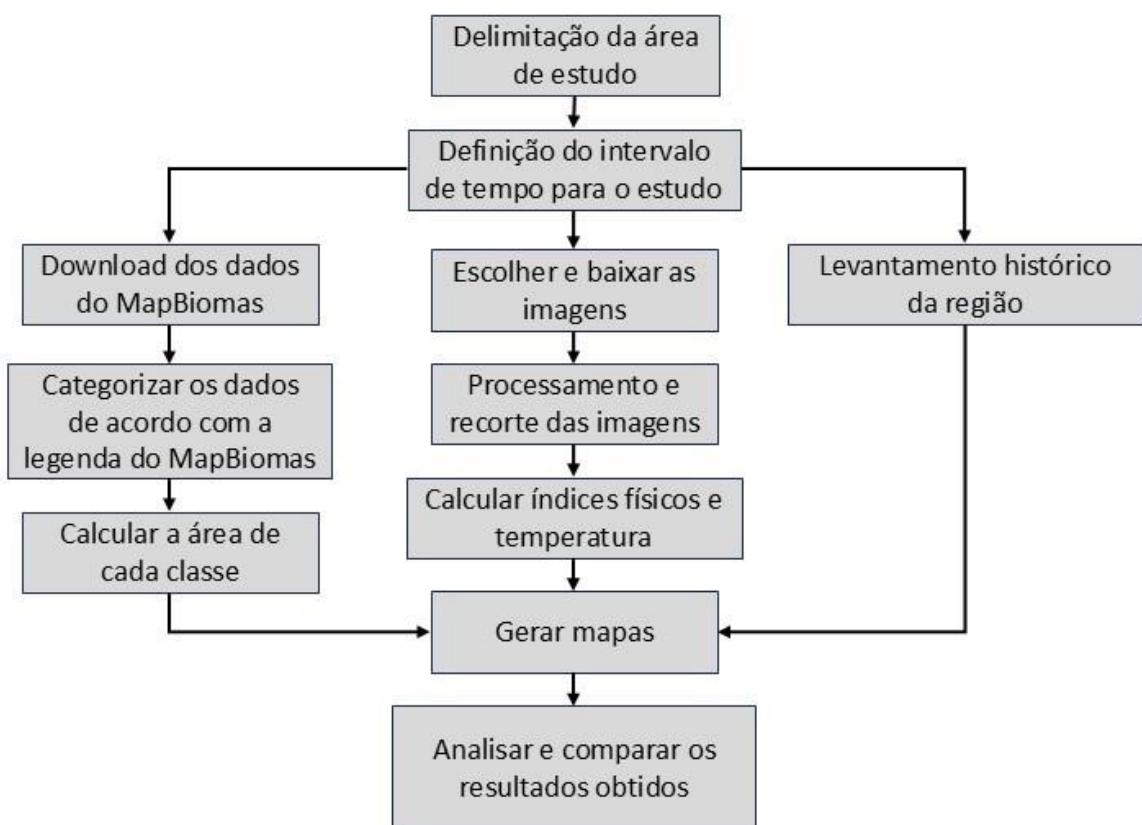
Os dados do MapBiomas utilizados neste trabalho foram obtidos por meio do Google Earth Engine, utilizando os materiais e manuais disponibilizados no site oficial do projeto. Foi empregado um script que permitiu realizar o upload da área de interesse, possibilitando o recorte dos dados conforme o ano desejado. Ao final do procedimento, os arquivos foram baixados no formato .tif, sendo necessário reprojetá-los para o sistema de coordenadas geográficas SIRGAS 2000, adotando a projeção UTM, fuso 24 sul.

Para a produção dos mapas, foi realizado o ajuste da simbologia das classes, conforme a documentação oficial do MapBiomas para a Coleção 9.

4 METODOLOGIA

Para a elaboração deste trabalho, foram utilizados dados da Coleção 9 do projeto MapBiomas, referentes aos anos de 1985, 1995, 2005, 2015 e 2023, sendo este o ano mais recente disponível. Os dados foram então baixados por meio da plataforma *Google Earth Engine*, que é uma ferramenta em nuvem capaz de processar imagens de satélite de forma rápida e acessível (GORELICK et al., 2017). O processamento das imagens utilizadas neste trabalho, assim como a elaboração dos mapas temáticos e os cálculos de áreas, foi realizado por meio do *software* livre QGIS, na versão 3.22.7, conforme o fluxograma a seguir.

Figura 4 — Fluxograma metodológico.



Fonte: O autor (2025).

4.1 ÁREA DE ESTUDO

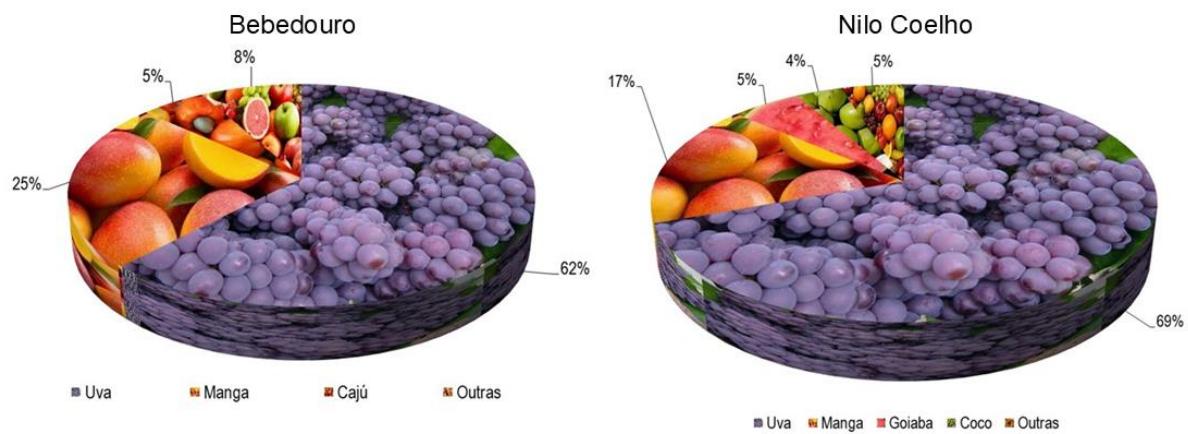
A área de estudo deste trabalho está situada majoritariamente ao norte da sede municipal de Petrolina, abrangendo os perímetros irrigados Bebedouro I e Senador Nilo Coelho, com o último estendendo-se até o município de Casa Nova – BA, às margens da principal fonte hídrica da região: o rio São Francisco, de onde é retirada toda a água necessária para o seu funcionamento.

Localizada a mais de 714 km de Recife, Petrolina está inserida na mesorregião pernambucana do São Francisco, situada na ecorregião da Depressão Sertaneja Meridional, que se estende do norte de Minas Gerais até o sul da Paraíba. O clima semiárido da região é caracterizado por poucas chuvas, que ocorrem em períodos bem definidos, com precipitação normalmente variando de 354,0 mm a 559,2 mm e temperatura média compensada entre 24,8 °C e 28,1 °C. A região apresenta relevo predominantemente suave-ondulado, com altitudes variando de 274 a 500 metros (PIMENTEL; ASSIS, 2022), sendo a parte mais baixa localizada às margens do São Francisco.

Devido à proximidade da região com a Linha do Equador, há uma alta incidência de raios solares, ultrapassando 3.000 horas por ano (INMET, 2022). Os solos mais comuns na região são os Neossolos Quartzarénicos e Latossolos, que apresentam fertilidade natural relativamente baixa, mas possuem boa drenagem e ótimo potencial para a agricultura, desde que sejam adotados manejo e adubação adequados (EMBRAPA, 2015).

Os fatores climáticos e o tipo de solo tornam a região ideal para o plantio de frutas como a manga e a uva, que apesar de não serem plantas nativas da região, adaptaram-se as condições do local e juntas representaram em 2023 mais de 86% da área plantada no perímetro irrigado Nilo Coelho e 87% no Bebedouro, com somente a uva representando mais de R\$ 1,8 bilhões em 2023 (CODEVASF, 2024).

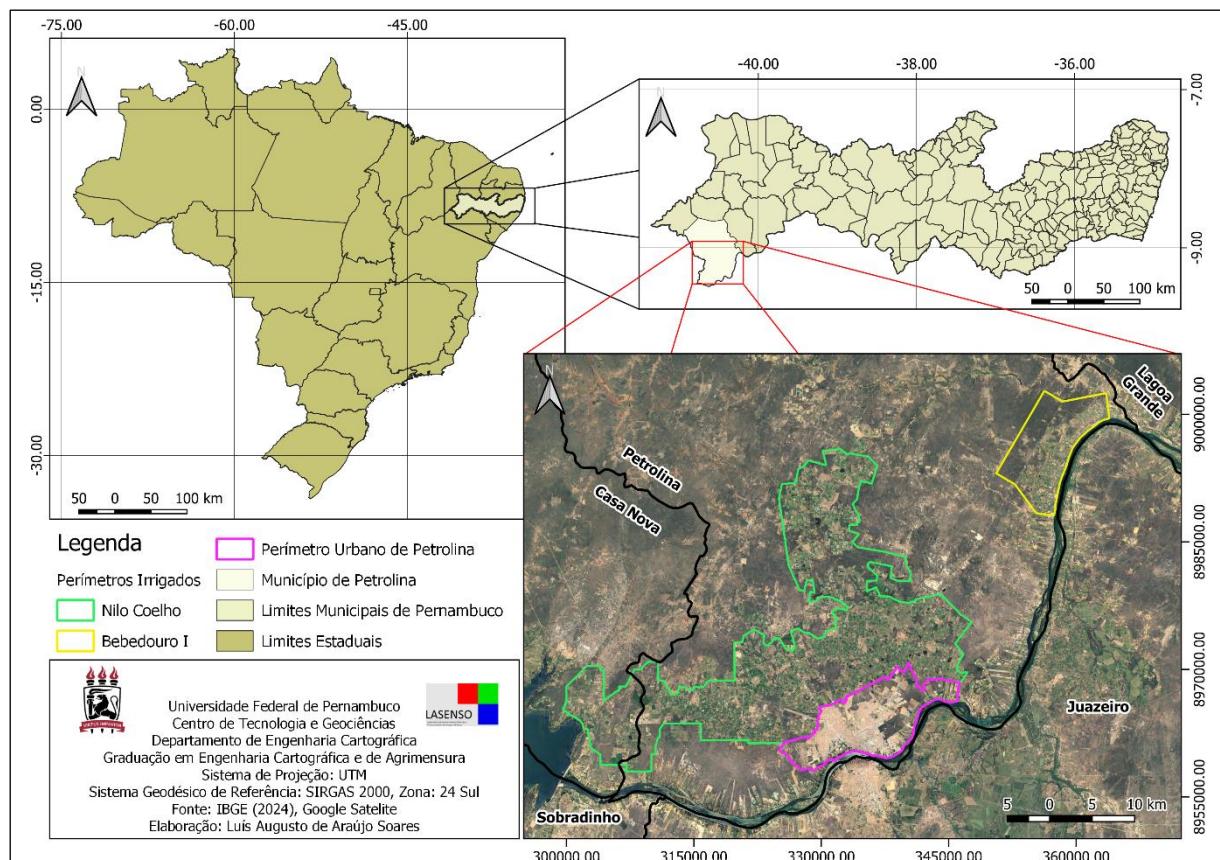
Figura 5 — Gráfico das principais espécies cultivadas nos perímetros irrigados Bebedouro e Nilo coelho em 2023



Fonte: CODEVASF (2024).

Para o estudo, foram utilizadas as poligonais dos perímetros irrigados, obtidas por meio da CODEVASF.

Figura 6 — Mapa de localização da área de estudo.



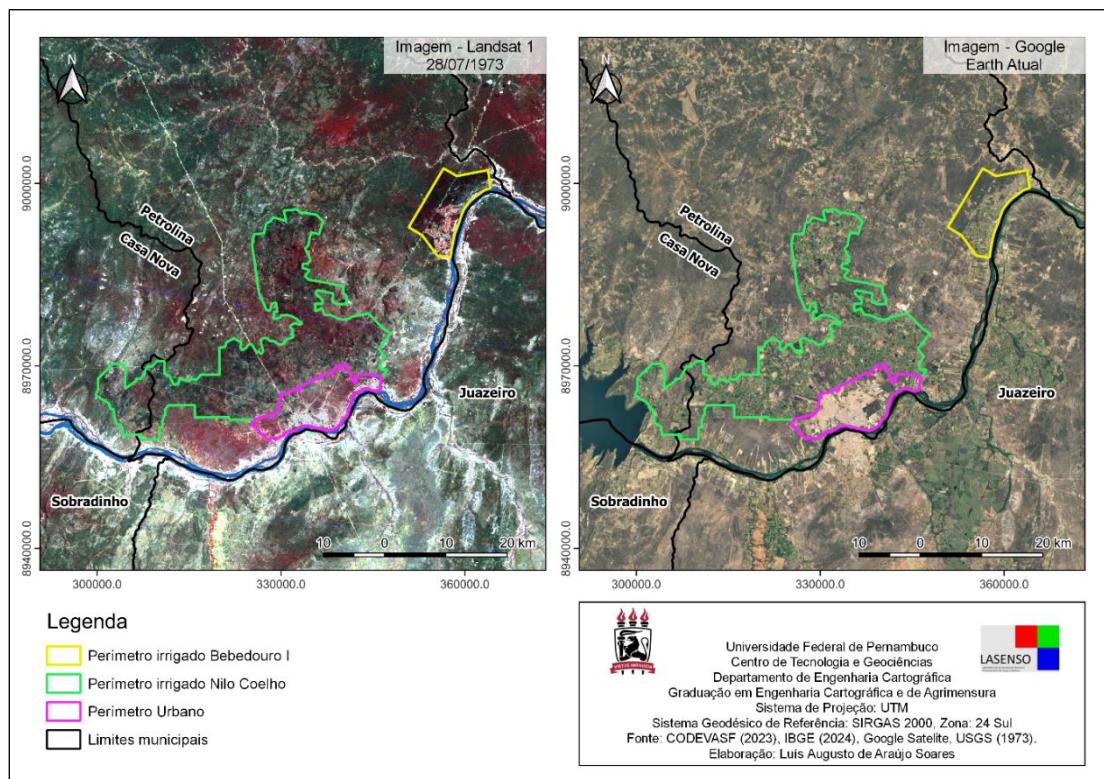
Fonte: O autor (2025).

Historicamente, a região era considerada uma das mais pobres e secas do país, devido às poucas chuvas e à falta de investimento público. Esse cenário começou a mudar em 1957, quando o Governo Federal criou o Grupo de Trabalho para o Desenvolvimento do Nordeste (GTDN). O grupo tinha como objetivo estudar soluções para reduzir a pobreza e estimular o desenvolvimento da região (ORTEGA; SOBEL, 2022).

Como resultado dos estudos, na década de 1960 o Governo Federal iniciou um ambicioso plano para o desenvolvimento regional, por meio da criação da Superintendência do Vale do São Francisco (SUVALE), instituída em 1967 pelo Decreto-Lei nº 292, e da implantação do primeiro perímetro irrigado, Bebedouro I, no ano seguinte. Esse projeto serviu como teste para avaliar a viabilidade econômica do modelo de irrigação.

Em 1973, teve início a construção da Barragem de Sobradinho, obra fundamental para o crescimento da região, pois proporcionou maior segurança hídrica. No ano seguinte, foi sancionada a Lei nº 6.088, de 1974, que criou a Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco (CODEVASF), com o objetivo de promover o desenvolvimento regional da bacia do rio São Francisco.

Figura 7 — Mapa comparativo 1973 – 2025.



Fonte: O autor (2025).

Com o sucesso do projeto Bebedouro I e a construção da Barragem de Sobradinho, teve início a expansão dos perímetros irrigados. Em 1984, entrou em operação o segundo e maior perímetro irrigado de Petrolina, o Senador Nilo Coelho. A partir de então, houve uma mudança na abordagem do Governo Federal, com a chegada de grandes empresas, a criação das primeiras cooperativas de produtores e, posteriormente, o investimento em capacitação por meio do SEBRAE, além das pesquisas desenvolvidas pela EMBRAPA na região.

Inicialmente voltada para a agricultura de subsistência, a produção nos perímetros irrigados passou a ser direcionada à produção em larga escala, com foco na exportação. Atualmente, o Perímetro Irrigado Bebedouro I ocupa uma área total de aproximadamente 9 mil hectares, beneficiando centenas de famílias. Somente em 2020, foram produzidas mais de 25 mil toneladas de alimentos, avaliadas em mais de R\$ 65 milhões (DIPIB, 2021). Já o Perímetro Nilo Coelho abrange uma área total de mais de 40 mil hectares, com uma área plantada superior a 22,5 mil hectares (DINC, 2024).

4.2 OBTENÇÃO DAS IMAGENS

Para a realização deste trabalho foram utilizadas imagens dos sensores MSS, advindo do satélite Landsat 1, TM do Landsat 5, OLI e TIRS do Landsat 8. Com as imagens do Landsat 5 e 8 sendo adquiridas através do portal *Earth Explorer* pertencente ao *United States Geological Survey (USGS)* e a imagem do Landsat 1 tendo sido adquirida através do site *Google Earth Engine (GEE)*, pois por tratar-se de uma imagem experimental, não é possível realizar o seu download no portal da USGS.

Para realizar o *download* das imagens basta definir o período da imagem que desejamos obter, a cobertura de nuvens e selecionar a área de estudo, através de um polígono ou uma cena, que para caso deste trabalho foi utilizada a cena da órbita ponto 217/66 para as imagens baixadas no site *Earth Explorer*. Para a imagem do Landsat 1, foi necessário utilizar um código no GEE que pesquisa por imagens deste sensor em várias coleções, até as coleções experimentais que

contém imagens com erros, com o seu uso em classificações não sendo recomendado.

As imagens utilizadas neste trabalho foram selecionadas em períodos de seca, devido à escassez de registros com baixa cobertura de nuvens, especialmente do satélite Landsat 5. A escolha dessas imagens nesse período do ano facilita a identificação das áreas de cultivo irrigado em comparação às demais, sobretudo nas regiões de Caatinga, que são extremamente difíceis de classificar em razão do comportamento espectral deste tipo de vegetação.

Tabela 4 — Características das imagens Landsat utilizadas.

Data	Satélite	Cobertura de nuvens (%)
28/07/1973	Landsat 1	-
06/09/1985	Landsat 5	27,00
17/08/1995	Landsat 5	8,00
15/10/2005	Landsat 5	0,00
09/09/2015	Landsat 8	0,02
15/09/2023	Landsat 8	0,00

Fonte: o autor (2025).

As datas das imagens foram escolhidas de forma que fosse possível avaliar como ocorreu a evolução da região ao longo dos anos, desde a construção dos perímetros irrigados até a atualidade, com a última data sendo 2023 devido a disponibilidade de dados do MapBiomas.

4.3 PROCESSAMENTO DAS IMAGENS

Nesta seção serão abordados os métodos utilizados para processar as imagens de satélite utilizadas neste trabalho, utilizando o *software* livre QGIS na versão 3.22.7 *Białowieża*.

O primeiro procedimento após realizar o *download* das imagens é a reprojeção das imagens para o sistema geodésico de referência brasileiro, o SIRGAS 2000. As imagens do Landsat por padrão são disponibilizadas no sistema geodésico de referência WGS84 utilizando a projeção UTM Norte de acordo com o fuso em que a imagem se encontra, neste caso trata-se do fuso 24.

Para realizar a reprojeção no QGIS 3.22, basta utilizar a ferramenta reprojetar coordenadas do GDAL, selecionando o arquivo RASTER da imagem e escolhendo o local onde será salvo o arquivo reprojetado, é necessário escolher o novo sistema de referência, para o caso deste trabalho, será adotado o SIRGAS 2000 UTM 24 sul.

4.3.1 LANDSAT 5

Para utilizar corretamente as imagens do sensor TM, é necessário realizar a transformação dos valores numéricos brutos do sensor, números digitais (DN), em uma grandeza que possa ser quantificada como a reflectância e a temperatura da superfície (CHANDER; MARKHAM, 2003). A seguir seguem os passos necessários para converter corretamente as informações do sensor TM do Landsat 5.

4.3.1.1 Calibração radiométrica

A primeira etapa no processamento das imagens consiste em transformar o número digital (ND) de cada pixel da imagem em radiância espectral monocromática, sendo uma etapa fundamental para transformar a informação de vários sensores em uma escala radiométrica comum (CHANDER; MARKHAM, 2003). A calibração radiométrica para cada banda é calculada através da equação:

$$L_\lambda = \left(\frac{L_{MAX_\lambda} - L_{MIN_\lambda}}{Q_{cal\ max}} \right) Q_{cal} + L_{MIN_\lambda} \quad (4)$$

Onde:

L_λ : Radiância espectral ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$)

Q_{cal} : Intensidade do pixel calibrado (varia de 0 a 255)

L_{MAX_λ} : Coeficiente espectral de calibração máximo ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$)

L_{MIN_λ} : Coeficiente espectral de calibração mínimo ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$)

Tabela 5 — Coeficientes espectrais de calibração e irradiação espectral por banda.

Banda	Radiância espectral		Irradiâncias espectral no topo da atmosfera
	L_{MIN_λ}	L_{MAX_λ}	
B1 (Azul)	-1,52	193,0	1957
B2 (Verde)	-2,84	365,0	1826
B3 (Vermelho)	-1,17	264,0	1554
B4 (NIR)	-1,51	221,0	1036
B5 (MIR)	-0,37	30,2	215
B6 (Termal)	1,2378	15,303	-
B7 (SWIR)	-0,15	16,5	80,67

Adaptado: Chander e Markham (2003).

4.3.1.2 Reflectância

Assim como ocorre com a radiância, a reflectância transforma os números digitais brutos de uma imagem em uma escala radiométrica real, possibilitando sua utilização em análises posteriores, como o cálculo de índices de vegetação. A reflectância para cada banda do Landsat 5 é calculada utilizando a equação abaixo proposta por Allen *et al.* (2002):

$$\rho_\lambda = \frac{\pi \cdot L_\lambda}{K_\lambda \cdot \cos Z \cdot d_r} \quad (5)$$

Onde:

ρ_λ : Reflectância planetária

L_λ : Radiância espectral ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$)

K_λ : Irradiância espectral no topo da atmosfera (conforme a tabela 5)

θ_s : Ângulo zenital solar

d_r : O quadrado da razão entre a distância média da Terra ao Sol (r_0) e a distância da Terra ao Sol (r) em um dia do ano, de acordo com a equação abaixo:

$$\left(\frac{r}{r_0}\right)^2 = 1,000110 + 0,034221 \cdot \cos \Gamma + 0,00128 \cdot \sin \Gamma + 0,000719 \cdot \cos 2\Gamma + 0,000077 \cdot \sin 2\Gamma \quad (6)$$

Onde Γ (rad) é calculado pela equação abaixo:

$$\Gamma = \frac{2\pi(D - 1)}{365} \quad (7)$$

Onde, D é o dia do ano em que a imagem foi capturada.

4.3.1.3 Cálculo dos índices de vegetação

$$NDVI = \frac{\text{Banda 4} - \text{Banda 3}}{\text{Banda 4} + \text{Banda 3}} \quad (8)$$

$$SAVI = \frac{(1 + L) \cdot (\text{Banda 4} - \text{Banda 3})}{(L + \text{Banda 4} + \text{Banda 3})} \quad (9)$$

Onde: $L = 0,5$.

$$IAF = -\frac{\ln\left(\frac{0,69 - SAVI - SZ}{0,59}\right)}{0,91} \quad (10)$$

4.3.1.4 Emissividade

A emissividade da superfície é calculada utilizando a equação de Plank invertida. Segundo Allen et al. (2002), a equação abaixo pode ser utilizada quando o $NDVI > 0$ e o $IAF < 3$.

$$\varepsilon_{NB} = 0,97 + 0,0033 \cdot IAF \quad (11)$$

Para os casos onde $IAF \geq 3$, $\varepsilon_{NB} = 0,98$. Já os casos onde o $NDVI \leq 0$, $\varepsilon_{NB} = 0,99$.

4.3.1.5 Temperatura da superfície

A temperatura da superfície é calculada utilizando a emissividade e a radiância espectral calculadas anteriormente (KRIZEK; SANTOS, 2022).

$$T_s = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{\varepsilon_{NB} \cdot K_1}{L_{\lambda 6}} + 1\right)} - 273,15 \quad (12)$$

Onde, $K_1 = 607,76 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ e $K_2 = 1260,56 \text{ K}$ são constantes de calibração que podem ser obtidas nos metadados das imagens.

4.3.2 LANDSAT 8

Devido às especificações diferentes dos sensores utilizados no OLI/TIRS do Landsat 8, em relação ao TM do Landsat 5, as equações empregadas para calcular a temperatura da superfície são distintas. Segue, abaixo, o passo a passo necessário para calcular a temperatura.

4.3.2.1 Calibração radiométrica

$$L_\lambda = M_L \cdot Q_{cal} + A_L \quad (13)$$

Onde:

L_λ : Radiância espectral ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$)

M_L : Coeficiente encontrada nos metadados da imagem (RADIANCE_MULT_BAND_)

Q_{cal} : Intensidade do pixel calibrado (varia de 0 a 255)

A_L : Contante encontrada nos metadados da imagem (RADIANCE_ADD_BAND_)

4.3.2.2 Temperatura da superfície

$$T_s = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} - 273,15 \quad (14)$$

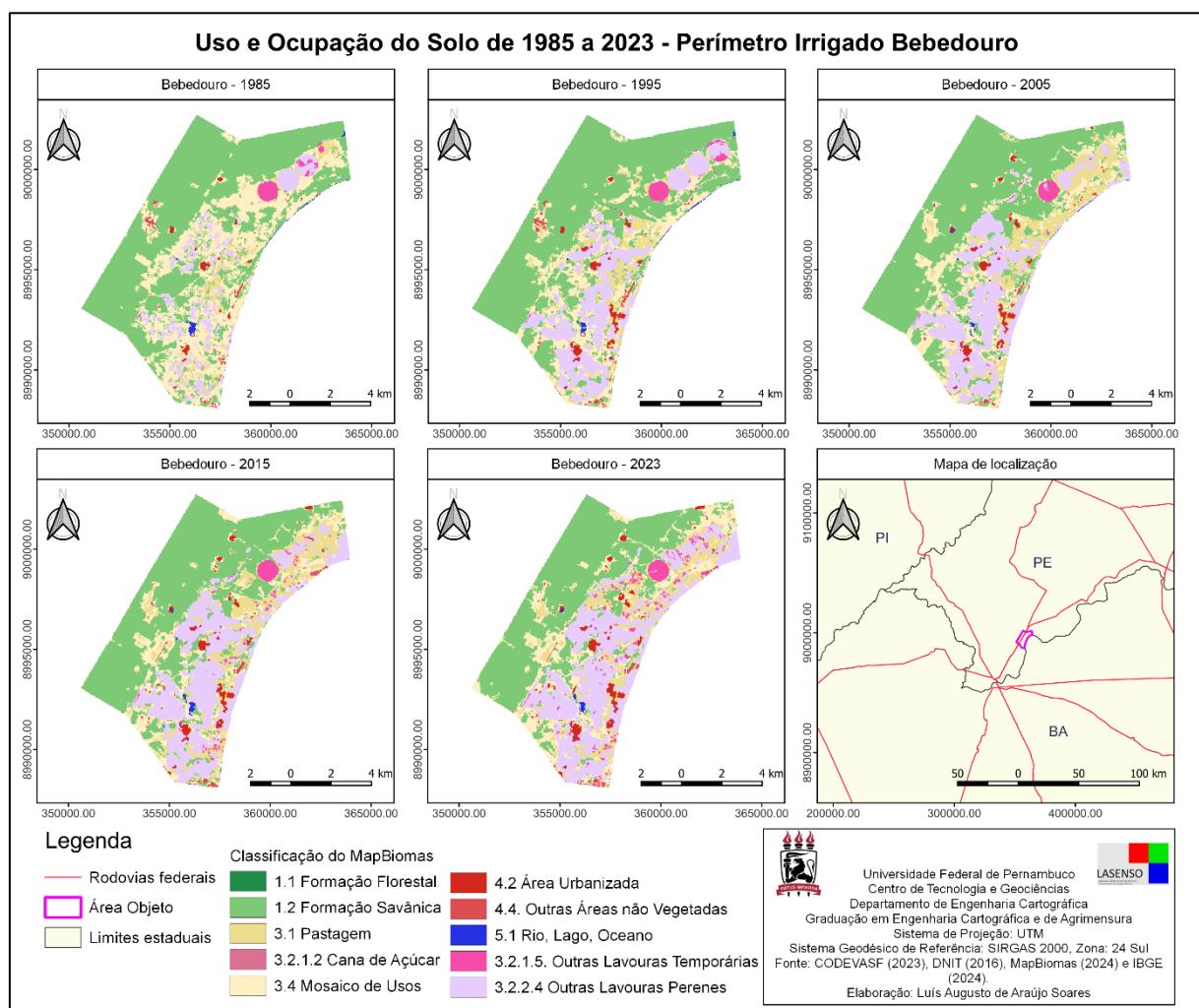
Onde, K1 e K2 são constantes encontradas nos metadados da imagem, K1_CONSTANT_BAND_x e K2_CONSTANT_BAND_x respectivamente, com o “x” sendo o número da banda (COELHO, 2013).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 MAPBIOMAS

Ao utilizar a coleção 9 do MapBiomas, é possível visualizar as mudanças significativas que a agricultura irrigada provocou na região entre os anos de 1985 e 2023. A análise temporal do uso e cobertura do solo revelou uma transformação expressiva na ocupação do território, cujos resultados podem ser observados nos mapas temáticos produzidos (figuras 6 e 7).

Figura 8 — Mapa da série histórica de 1985 a 2023 do uso e ocupação do solo no perímetro irrigado Bebedouro.



Fonte: O autor (2025).

Para o perímetro Bebedouro, é possível observar que, desde o primeiro ano da série, a vegetação nativa da Caatinga já havia sido amplamente suprimida. Conforme a Tabela 2, mais da metade da área já estava desmatada, com a vegetação nativa perdendo progressivamente espaço. Em 1995, essa cobertura representava menos da metade da área ocupada, chegando ao menor valor da série em 2023, com apenas 37,7% da área sendo classificada como de formação florestal ou formação savânicas (Caatinga).

Além da supressão da vegetação nativa, nota-se também uma mudança no uso do solo, especialmente no tipo de agricultura predominante. As áreas anteriormente classificadas como "mosaico de usos" — que, de acordo com o MapBiomas (2024), correspondem a zonas agropecuárias onde não é possível distinguir claramente entre pastagem e agricultura — vêm sendo substituídas por lavouras perenes. Essa mudança provavelmente está associada à transição do modelo produtivo, que passou de uma lógica voltada à agricultura familiar de subsistência para um sistema baseado em monoculturas e cultivos permanentes.

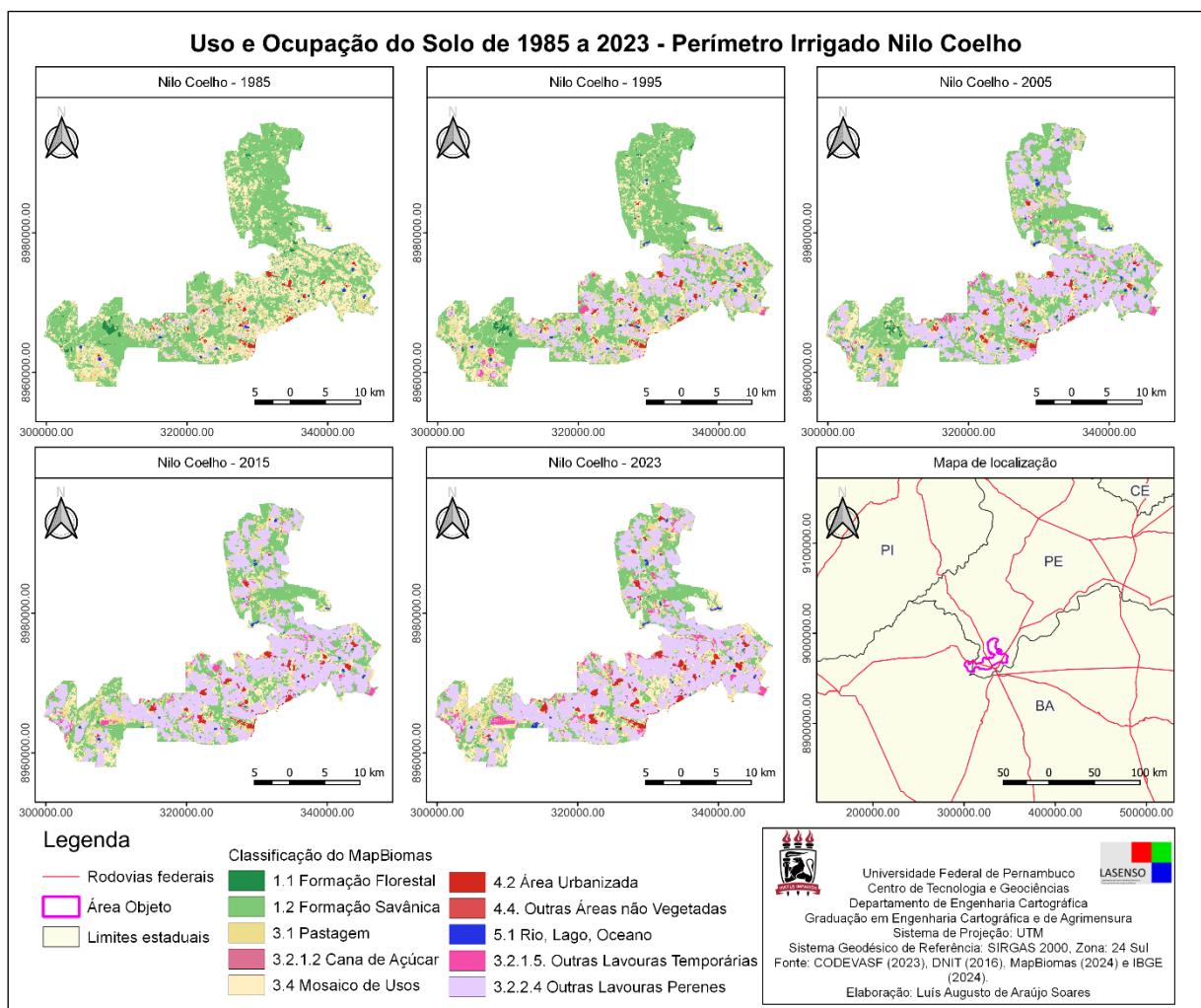
Tabela 6 — Uso e ocupação do solo no perímetro irrigado Bebedouro.

Classe	Código ID	Área (Km ²)				
		1985	1995	2005	2015	2023
1.1 Formação florestal	3	0,015	0,018	0,008	0,029	0,009
1.2 Formação savânicas	4	51,04	49,82	46,45	42,62	36,99
3.1 Pastagem	15	3,85	5,987	10,65	11,35	10,00
3.2.1.2 Cana de açúcar	20	0,006	0	0	0	0
3.2.1.5 Outras lavouras temporárias	41	1,195	1,187	0,93	1,60	2,60
3.2.2.4 Outras lavouras perenes	48	7,265	16,59	18,68	22,04	25,02
3.4 Mosaico de usos	21	28,41	17,32	14,63	13,02	15,81
4.2 Área urbanizada	24	0,514	1,226	1,37	1,58	1,92
4.4 Outras áreas não vegetadas	25	0,712	0,904	0,442	0,819	0,742
5.1 Rio, Lago, Oceano	33	0,338	0,291	0,189	0,24	0,195

Fonte: MapBiomas (2024).

Com base na tabela apresentada, é possível notar grandes alterações no uso e ocupação do solo em algumas classes, enquanto outras apresentam pouca variação ao longo dos anos — como é o caso das classes de formação florestal e de cana-de-açúcar, sendo esta última identificada apenas no primeiro ano da série. Outra observação diz respeito às áreas urbanizadas, que aumentaram 1,427 km² entre os anos de 1985 e 2023, apresentando um crescimento constante ao longo dos anos.

Figura 9 — Mapa da série histórica de 1985 a 2023 do uso e ocupação do solo no perímetro irrigado Nilo Coelho.



Fonte: O autor (2025).

Apesar de ter entrado em operação mais de 11 anos após o Bebedouro, o perímetro Nilo Coelho já havia perdido grande parte de sua vegetação nativa apenas um ano após o início oficial de suas atividades, em 1984. A área de formação savânica, por exemplo, passou de aproximadamente 325,8 km² em 1985 para cerca de 123,8 km² em 2023, o que representa uma redução de 61,9%.

Também é possível observar, por meio do mapa e da Tabela 3, que a classe “outras lavouras perenes” apresentou o maior aumento ao longo do período, passando de cerca de 12,8 km² em 1985 para mais de 271,7 km² em 2023, o que evidencia a intensa transformação ocorrida na região ao longo dos anos.

Tabela 7 — Uso e ocupação do solo no perímetro irrigado Nilo Coelho.

Classe	Código ID	Área (Km ²)				
		1985	1995	2005	2015	2023
1.1 Formação florestal	3	8,849	5,652	3,518	0,452	0,295
1.2 Formação savânica	4	325,83	284,18	216,64	171,93	123,86
3.1 Pastagem	15	34,77	61,118	40,720	44,134	47,672
3.2.1.2 Cana de açúcar	20	0	0,704	0	0	0
3.2.1.5 Outras lavouras temporárias	41	0,645	6,552	9,366	12,399	22,946
3.2.2.4 Outras lavouras perenes	48	12,844	105,71	210,23	254,85	271,77
3.4 Mosaico de usos	21	193,0	109,31	89,947	85,412	97,472
4.2 Área urbanizada	24	6,911	8,764	10,709	12,971	16,873
4.4 Outras áreas não vegetadas	25	0,185	0,324	0,582	0,892	0,809
5.1 Rio, Lago, Oceano	33	2,496	3,222	3,822	2,502	3,839

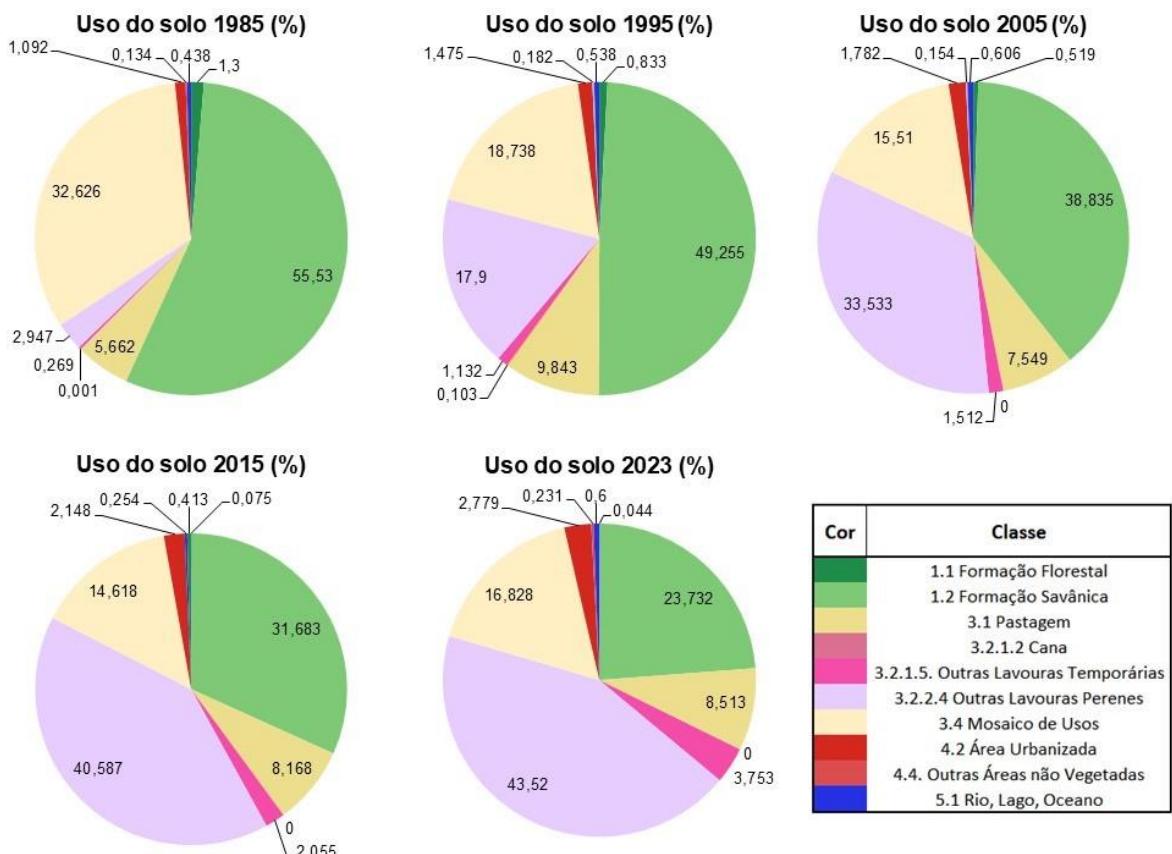
Fonte: MapBiomas (2024).

Assim como no perímetro Bebedouro, o Nilo Coelho apresenta algumas classes que variaram significativamente ao longo dos 38 anos analisados. No entanto, diferentemente da primeira área, a classe de formação florestal sofreu uma redução de mais de 96% em relação à área calculada em 1985, enquanto a classe de corpos d’água variou em proporção semelhante. Essa variação negativa pode indicar que a classificação referente ao ano de 2015, realizada pelo MapBiomas,

tenha utilizado predominantemente imagens obtidas durante o período seco — possivelmente devido à escassez de imagens em épocas de maior precipitação.

A Figura 5 apresenta um gráfico com a evolução do uso e ocupação do solo das áreas dos perímetros Bebedouro e Nilo Coelho combinadas, nos anos de interesse. É possível observar a diminuição gradual das áreas de formação savântica, que representavam mais de 55,5% da área estudada em 1985 e passaram a ocupar menos de 22,7% em 2023. O mesmo ocorreu com a classe “mosaico de usos”, que foi reduzida quase pela metade entre 1985 e 1995, mas que se manteve relativamente estável nos anos seguintes. As áreas perdidas por essas classes foram ocupadas, principalmente, por zonas urbanizadas — que dobraram no período analisado —, por lavouras temporárias e por lavouras perenes, sendo esta última responsável por um aumento expressivo: de aproximadamente 2,9% em 1985 para mais de 43,5% em 2023.

Figura 10 — Mapa da série histórica de 1985 a 2023 do uso e ocupação do solo nos perímetros irrigados.

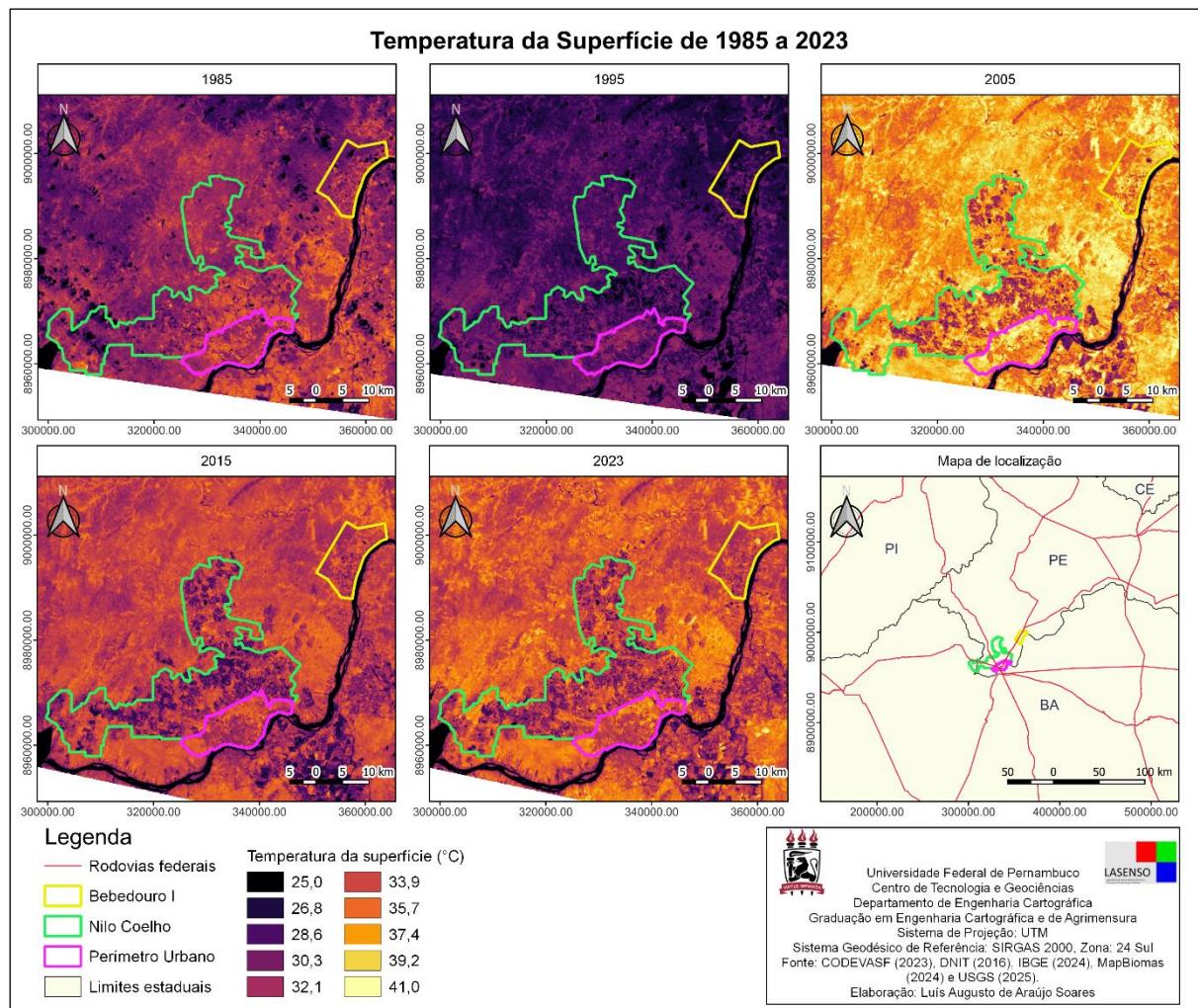


Fonte: MapBiomas (2024).

5.2 TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE

A partir das imagens do Landsat 5 e 8 foi possível calcular a temperatura da superfície na região estudada, permitindo que possamos observar como a temperatura variou ao longo dos anos na região. O resultado do cálculo da temperatura da superfície pode ser visualizado nos mapas temáticos a seguir.

Figura 11 — Mapa da série histórica de 1985 a 2023 da temperatura da superfície na área de estudo.



Fonte: O autor (2025).

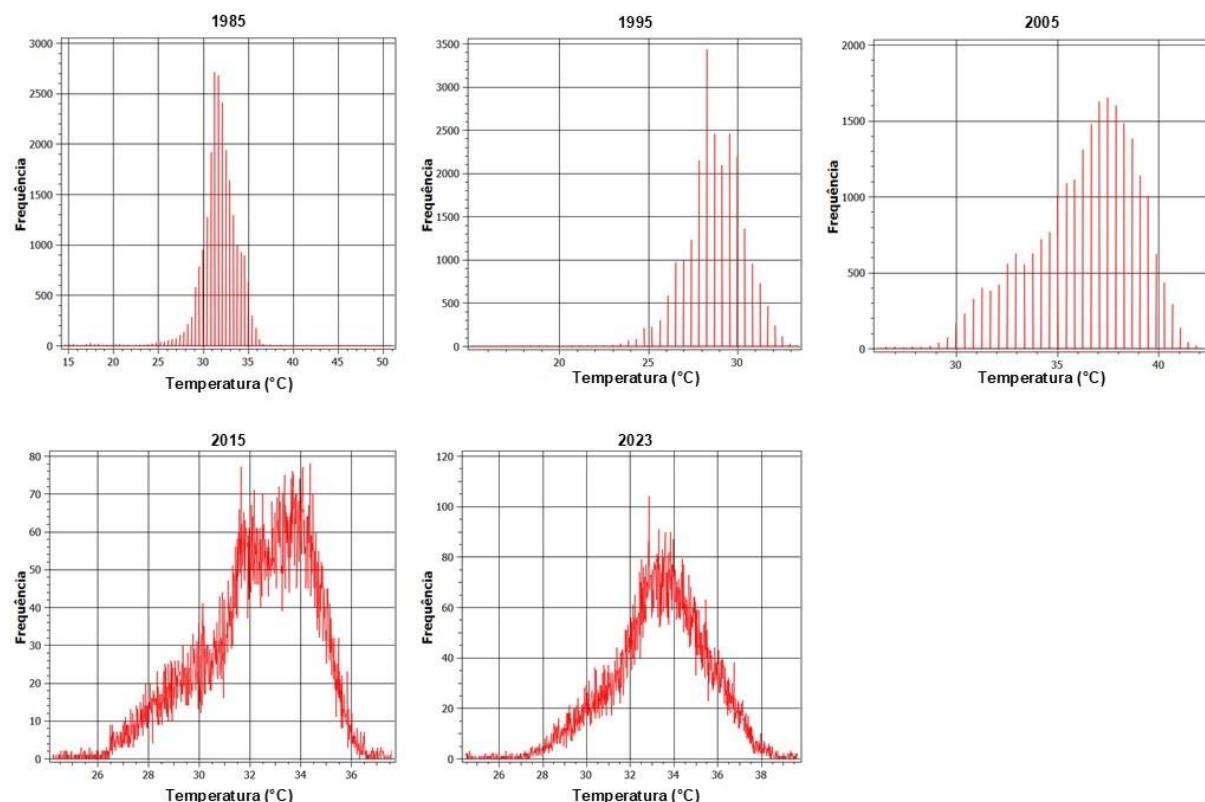
Ao analisarmos o mapa acima, é possível notar que inicialmente em 1985 a variação de temperatura não é significativa, com as áreas dos perímetros irrigados e a área urbana apresentando temperaturas semelhantes, o que se deve ao fato de que a maior parte do solo era ocupada por vegetação nativa. Na imagem seguinte, em 1995 é possível notar que houve uma grande diminuição na temperatura de

forma geral, o que pode ter acontecido devido a alguma condição climática na época em que a imagem foi capturada, mas é possível notar que há uma menor homogeneidade entre as áreas, principalmente na área do perímetro irrigado Bebedouro.

A partir da imagem de 2005 é possível notar uma grande discrepância entre as temperaturas dentro dos perímetros irrigados com as áreas circundantes, com as áreas irrigadas apresentando temperaturas consideravelmente mais baixas, o que se deve ao fato da presença de plantas que não são nativas da Caatinga e a abundância de água nessas áreas, permitindo uma maior evaporação e reduzindo a temperatura ambiente.

Vale a pena ressaltar que a vegetação da Caatinga aparenta ter uma temperatura mais elevada não só em relação aos perímetros irrigados, mas também em relação a área urbanizada, o que fica aparente nas imagens de 2015 e 2023, onde a área urbana apresenta uma tonalidade mais escura em relação as áreas ao redor, o que indica temperaturas mais amenas.

Figura 12 — Histogramas da série histórica de 1985 a 2023 da temperatura da superfície.

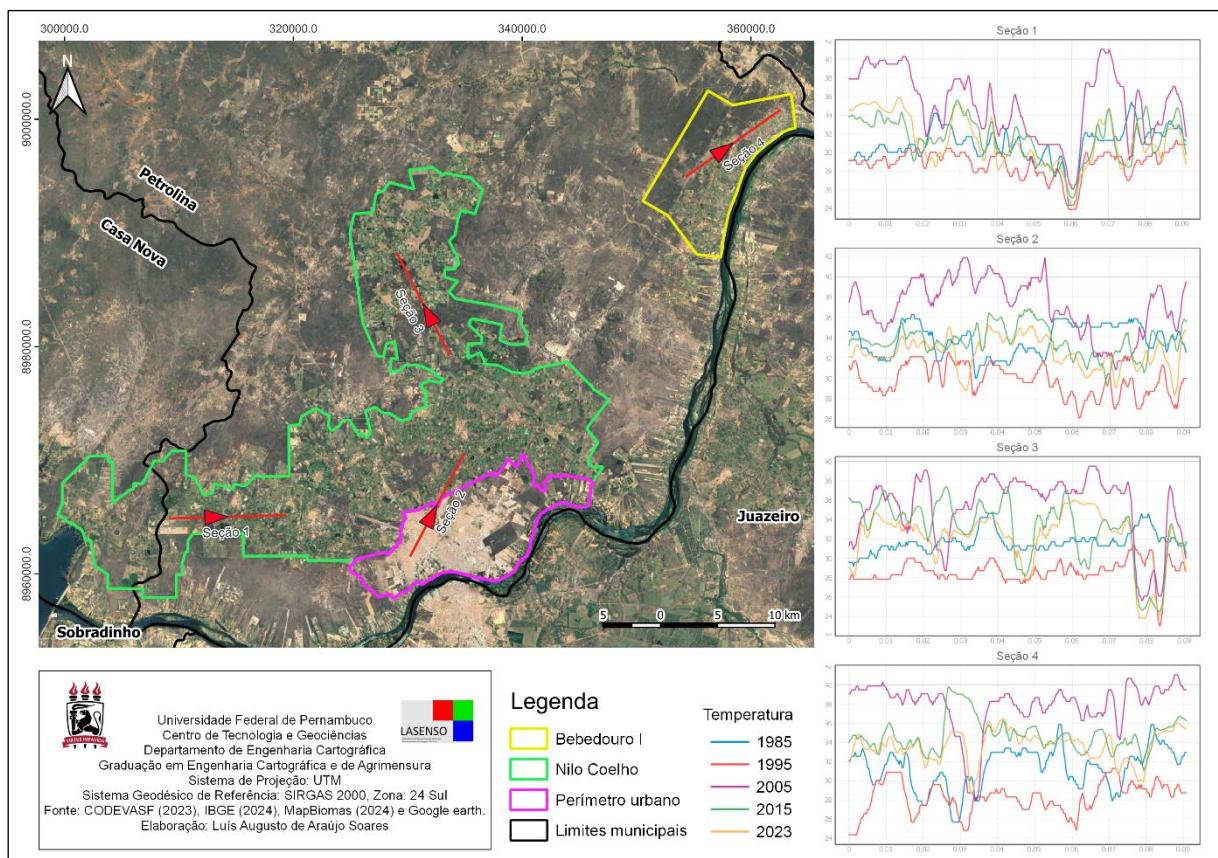


Fonte: O autor (2025).

Ao analisarmos os histogramas a primeira coisa que fica aparente é a diferença do comportamento dos gráficos entre as imagens do Landsat 5 (1985, 1995 e 2005) e as imagens do Landsat 8 (2015 e 2023), o que ocorre devido a diferença entre a resolução radiométrica dos dois satélites.

Também é possível notar que não houve uma tendência clara no comportamento da temperatura da superfície, com a mesma variando de forma aleatória ao longo dos anos.

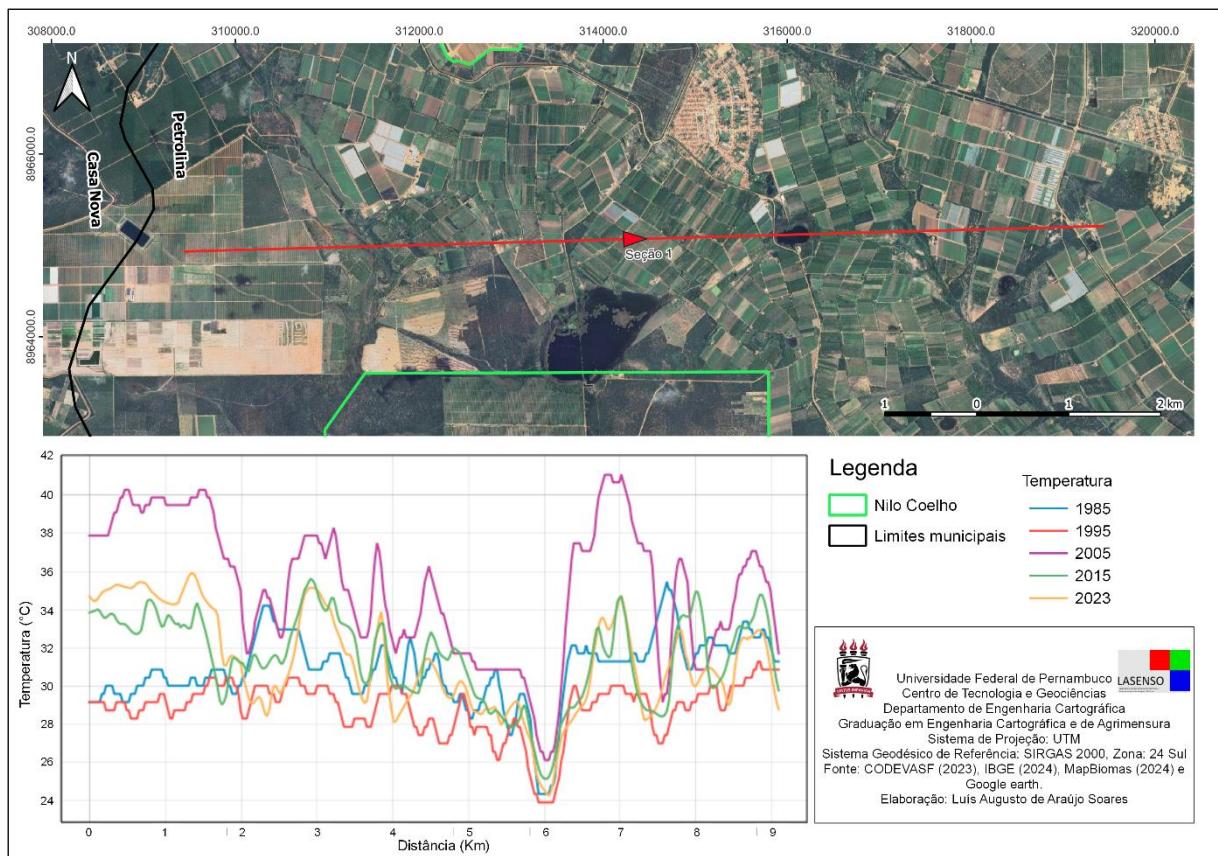
Figura 13 — Mapa com as seções de temperatura na região.



Fonte: O autor (2025).

No mapa anterior temos as seções com as temperaturas registradas na série histórica. Ao analisarmos os gráficos, podemos notar que as temperaturas nessas áreas variam de maneira uniforme ao longo dos anos, com a exceção sendo os casos onde houve uma mudança radical no uso do solo.

Figura 14 — Mapa com da seção 1 de temperatura.

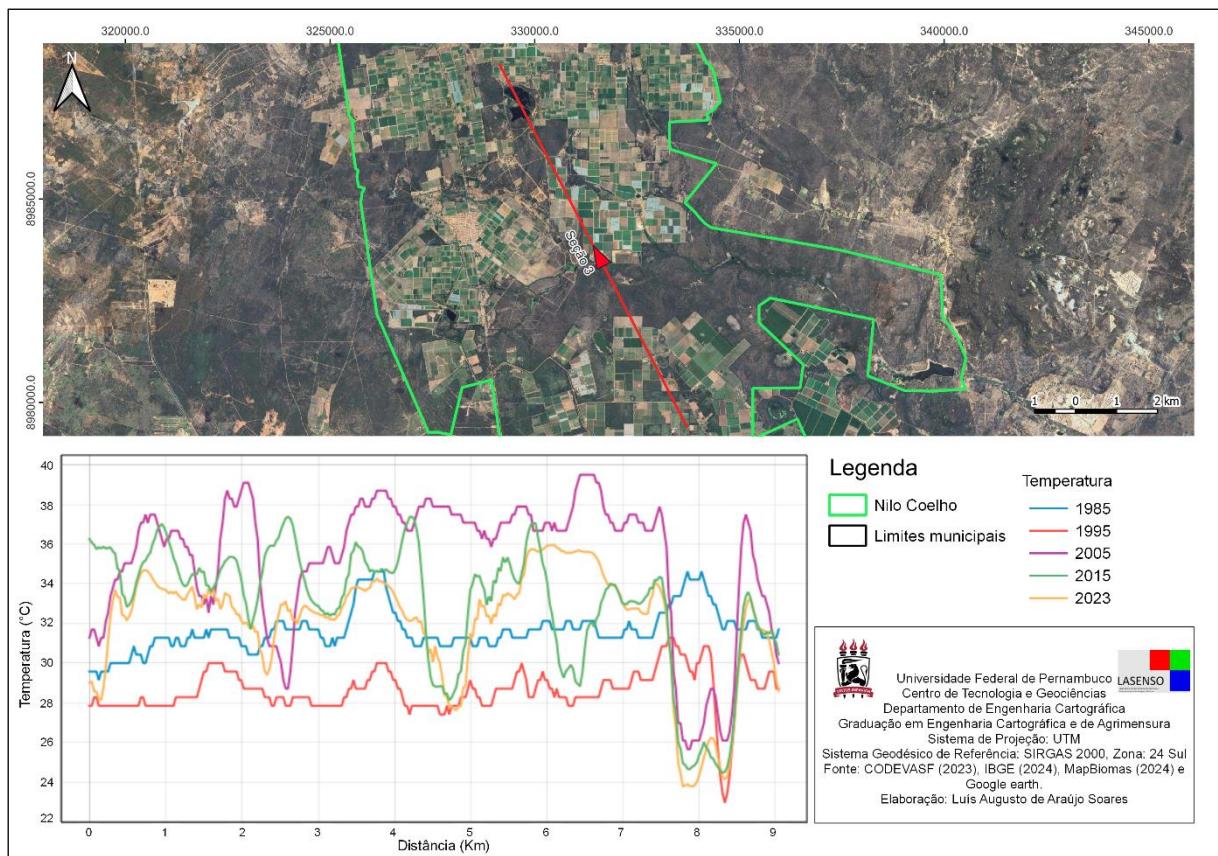


Fonte: O autor (2025).

Ao focarmos na seção 1, é possível notar que ocorre uma grande variação de temperatura, especialmente entre os primeiros 1,5 km da seção, nesta área até o ano de 1995 havia uma reserva de caatinga, com a temperatura para esses anos sendo semelhante, a partir de 2005 é possível notar a elevação da temperatura do solo, o que pode ter ocorrido devido ao desmatamento da região, que de acordo com a classificação do MapBiomas a área passou a ser utilizada como pastagem.

Também é possível notar que há um reservatório d'água por volta dos 6 km de extensão da seção, nesta região a temperatura em todas as imagens é bem inferior a temperatura da região devido as características da água.

Figura 15 — Mapa com da seção 1 de temperatura.



Fonte: O autor (2025).

Para o caso da seção 3, assim como nas outras seções é possível ver uma variação grande de temperatura entre as datas, porém uma boa parte da seção está em área de vegetação preservada ou em área destinada ao pasto, nas áreas onde a Caatinga deu lugar a culturas perenes, como é o caso da área próximo aos 5 km, houve uma diminuição significativa da temperatura a partir do ano de 2015, quando a área passou a ser classificada como utilizada para agricultura perene.

Ao analisar o gráfico, também é possível notar que houve a construção de um reservatório d'água a partir do ano de 1995, que é possível visualizar na imagem atual de satélite, com a temperatura da região caindo drasticamente com a sua construção. Esse reservatório fez parte da expansão do perímetro Nilo Coelho que foi iniciada após o ano de 1985.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho de conclusão de curso se propôs a analisar a dinâmica temporal do uso e ocupação do solo nos perímetros irrigados Bebedouro e Senador Nilo Coelho, no município de Petrolina-PE, avaliando o impacto da expansão da agricultura irrigada sobre a vegetação nativa da Caatinga e a temperatura de superfície entre os anos de 1985 e 2023. A utilização de dados da plataforma MapBiomass e o processamento de imagens dos satélites Landsat 5 e 8 permitiram alcançar os objetivos propostos, fornecendo um panorama quantitativo e qualitativo das profundas transformações ocorridas na região.

Os resultados confirmaram a hipótese central de que a agricultura irrigada foi o principal agente modificador da paisagem. A análise multitemporal revelou uma substituição expressiva da vegetação nativa por áreas de cultivo, especialmente de lavouras perenes. A cobertura de Formação Savântica, que representava mais da metade da área de estudo em 1985 (55,5%), foi reduzida a menos de um quarto (22,7%) em 2023. Em contrapartida, as lavouras perenes, que ocupavam apenas 2,9% da área, expandiram-se para 43,5%, tornando-se a classe de uso predominante. Este processo foi acompanhado por um crescimento das áreas urbanizadas e uma reconfiguração das práticas agrícolas, com a diminuição do "mosaico de usos", o que sugere uma transição de sistemas produtivos diversificados para um modelo de monocultura em larga escala.

A análise da temperatura de superfície, por sua vez, demonstrou uma consequência direta dessa mudança de cobertura. As áreas irrigadas, devido à maior umidade e à presença de vegetação com alta atividade de evapotranspiração, apresentaram temperaturas consistentemente mais baixas em comparação com as áreas de Caatinga adjacentes, que se mostraram mais quentes. Este fenômeno, que cria "ilhas de frescor" no meio do semiárido, evidencia o impacto da irrigação no microclima local. Embora não tenha sido observada uma tendência clara de aquecimento ou resfriamento geral ao longo dos 38 anos, a redistribuição espacial dos padrões de temperatura é inequívoca e está diretamente associada à conversão do uso do solo.

As limitações deste estudo residem na dependência da classificação do MapBiomass e na análise da temperatura em datas específicas, que podem ser

influenciadas por condições meteorológicas pontuais. No entanto, os resultados são robustos e consistentes com a realidade observada na região.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se aprofundar a análise com uma frequência temporal anual para capturar a dinâmica de conversão de forma mais detalhada. Seria enriquecedor, também, realizar validações de campo para os dados de temperatura e correlacionar as mudanças no uso do solo com variáveis socioeconômicas, como dados de produção agrícola, valor da terra e crescimento populacional, a fim de compreender melhor os vetores dessa transformação.

Conclui-se, portanto, que o desenvolvimento da fruticultura irrigada em Petrolina, embora exitoso do ponto de vista econômico, promoveu uma intensa e rápida conversão da paisagem, com supressão significativa do bioma Caatinga e alterações microclimáticas relevantes. Este estudo reforça o papel crucial das geotecnologias como ferramenta de diagnóstico e monitoramento, fornecendo subsídios essenciais para que gestores públicos e produtores possam buscar um caminho de maior equilíbrio entre a produção agrícola e a conservação ambiental no semiárido brasileiro.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, Richard et al. **SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land). Advanced Training and Users Manual**. Versão 1.0. Kimberly: University of Idaho, 2002.
- ANDERSEN, H.-E.; REUTEBUCH, S. E.; MCGAUGHEY, R. J. Active remote sensing. **Computer Applications in Sustainable Forest Management**, Springer, 2006. p. 43–66.
- ARAÚJO, E. D. S; SILVA, J. B; MACHADO, C. C. C. Identificação de Ilhas de calor na cidade de Campina Grande-PB utilizando Sensoriamento Remoto. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 2, p. 614-626, 2016.
- ARAUJO, Taciana Lima. **Estimativa da temperatura e do saldo de radiação à superfície terrestre em Maceió-AL utilizando imagens TM/LANDSAT 5**. 2006. 88 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2006.
- ASNER, G. P., SCURLOCK, J. M. O., JEFFREY A. HICKE. Global synthesis of leaf area index observations: implications for ecological and remote sensing studies. **Global Ecology & Biogeography**. v.12, p.191–205, 2003.
- BERNINI, Henrique; OLIVEIRA, Dennis de Souza; MORET, Artur de Souza. O uso de geoprocessamento para a tomada de decisão na utilização de recursos naturais estudo de caso Resex do Rio Ouro Preto – RO. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, n. 13. 2007, Florianópolis: INPE, 2007, p. 2315-2322.
- BONHAM-CARTER, Graeme F. **Geographic Information Systems for Geoscientists**. 13 ed. Ottawa: Pergamon, 1994. 398 p.
- BRASIL. Secretaria de Patrimônio da União; UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE. **Apostila de sensoriamento remoto**. [S. I.], 2017.
- CAMPOS, S. X.; RAMOS, J. S. Uso de Imagens Landsat no Monitoramento de Recursos Naturais. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, n. 6, p. 1801–1815, 2017.
- CHANDER, G.; MARKHAM, B. Revised landsat-5 tm radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, n. 11, p. 2674–2677, nov. 2003.
- CHUVIECO, E. **Fundamentals of Satellite Remote Sensing: An Environmental Approach**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2016.

CODEVASF- Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e Parnaíba. **Projeto de Gerenciamento Integrado das Atividades Desenvolvidas em Terra na Bacia do São Francisco ANA/GEF/PNUMA/OEA Subprojeto 4.5C – Plano Decenal de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco - PBHSF (2004-2013)**, 150p. 2004.

COELHO, André Luiz Nascentes; CORREA, Wesley de Souza Campos. Temperatura de superfície Celsius do sensor TIRS/LANDSAT-8: metodologia e aplicações. **Revista Geográfica Acadêmica**, v. 7, n. 1, p. 31-45, dez. 2013.

DISTRITO DE IRRIGAÇÃO DO PERÍMETRO IRRIGADO DE BEBEDOURO (DIPIB). **Plano Operativo Anual (POA) 2021**. Petrolina, PE, 2021. Disponível em: <https://www.codevasf.gov.br/assuntos/agricultura-irrigada/projetos-de-irrigacao/em-producao/bebedouro/plano-operativo-anual-poa-2021-bebedouro.pdf>. Acesso em: 24 jun. 2025.

DISTRITO DE IRRIGAÇÃO SENADOR NILO COELHO (DINC). **Plano Operativo Anual (POA) 2024**. Petrolina, PE, 2024. Disponível em: https://www.dinc.org.br/anexo/POA_2024.pdf. Acesso em: 24 jun. 2025.

DE, F.; ASSIS, W. L. ANÁLISE DA VARIABILIDADE CLIMÁTICA NO MUNICÍPIO DE PETROLINA- PE ENTRE OS ANOS DE 1973-2021. **Revista de Geografia - PPGEO - UFJF**, v. 12, n. 2, p. 281-303, 21 dez. 2022.

ELACHI, Charles; ZYL, Jakob J. van. **Introduction to the Physics and Techniques of Remote Sensing**. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, v. 1, f. 286, 2006. 572 p.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **LANDSAT - Land Remote Sensing Satellite**. 2013. Disponível em: <https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento/missoes/landsat>. Acesso em: 26 jan. 2025.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. *Sistema de produção da manga: região do Vale do São Francisco*. Brasília: Embrapa, 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br>. Acesso em: 22 jun. 2025.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Monitoramento da Agricultura Irrigada com o uso de imagens Landsat-8. Brasília: Embrapa, 2017.

FLORENZANO, Teresa Gallotti. **Imagens de satélite para estudos ambientais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2002. 97 p.

FLORENZANO, Teresa Gallotti. **Iniciação em Sensoriamento Remoto**. 3 ed. Oficina de Textos, 2011. 128 p.

GAO, Bo-Cai. NDWI-A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote Sensing of Environment**, v. 58, n. 3, p. 257-266, Dezembro de 1996.

GORELICK, N.; HUYBERS, P.; KOH, W.; et al. **Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone**. *Remote Sensing of Environment*, v. 202, p. 18–27, 2017.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICAS. **Censo Brasileiro de 2022**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 18 jan. 2025.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). *Normais climatológicas do Brasil 1991–2020*. Brasília: INMET, 2020. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Acesso em: 15 jun. 2025.

JI, Lei; ZHANG, Li; WYLIE, Bruce. Analysis of Dynamic Thresholds for the Normalized Difference Water Index. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 75, n. 11, p. 1307-1317, novembro 2009.

JENSEN, J. R. Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres. São José dos Campos: Parêntese, 2009.

JÉSSICA FERNANDA DE LIMA. **ÍNDICES ESPECTRAIS, TEMPERATURA E O ALBEDO DE SUPERFÍCIE NO BIOMA DA CAATINGA UTILIZANDO IMAGENS ORBITAIS**, f. 63 Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2020.

KRIZEK, João Pedro Ocanha; SANTOS, Luciana Cavalcanti Maia. Protocolo metodológico para obtenção dos valores de radiância, emissividade e temperatura de superfície de imagens Landsat 8 utilizando LEGAL. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 15, n. 06, p. 3077-3092, 2022.

MALIQI, Edon; PENEV, Petar; KELMENDI, Faik. CREATING AND ANALYSING THE DIGITAL TERRAIN MODEL OF THE SLIVOVO AREA USING QGIS SOFTWARE. **GEODESY AND CARTOGRAPHY**, 22 setembro 2017. Disponível em: <https://journals.vilniustech.lt/index.php/GAC/article/view/559>. Acesso em: 25 jan. 2025.

MAPBIOMAS BRASIL. **Legenda Coleção 9: Descrição Detalhada**. [S. I.], 2024. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/wp-content/uploads/sites/4/2024/08/Legenda-Colecao-9-Descricao-Detalhada-PDF-PT.pdf>. Acesso em: 27 jun. 2025.

MapBiomas **Brasil.** Disponível em: <<https://brasil.mapbiomas.org/produtos/?category=methodology>>. Acesso em: 20 jun. 2025.

MCFEETERS, S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. **International Journal of Remote Sensing**, v. 17, n. 7, p. 1425-1432, 1996.

MENESES, Paulo Roberto (Org) *et al.* **INTRODUÇÃO AO PROCESSAMENTO DE IMAGENS DE SENSORIAMENTO REMOTO**. Brasília, 2012.

MOREIRA, M. A. Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação. 4. ed. Viçosa: UFV, 2011.

MOUCO, M. A. DO C. (Ed.). **Cultivo da Mangueira**. 3. ed. Petrolina, PE: Embrapa Semiárido, 2015. 103 p. (Sistemas de Produção, n. 2).

NASA GODDARD SPACE FLIGHT CENTER. **Landsat 8**. Greenbelt, MD: NASA. Disponível em: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-8/>. Acesso em: 23 de fevereiro de 2025.

NOVO, Evelyn Márcia Leão de Moraes; PONZONI, Flávio Jorge. **INTRODUÇÃO AO SENSORIAMENTO REMOTO**. São José dos Campos: INPE, 2001. 68 p.

ORTEGA, A. C.; SOBEL, T. F. DESENVOLVIMENTO TERRITORIAL E PERÍMETROS IRRIGADOS: AVALIAÇÃO DAS POLÍTICAS GOVERNAMENTAIS IMPLANTADAS NOS PERÍMETROS IRRIGADOS BEBEDOURO E NILO COELHO EM PETROLINA (PE). **Planejamento e Políticas Públicas**, n. 35, 2022.

PIMENTEL, Franciele de Oliveira; ASSIS, Wellington Lopes. Análise da variabilidade climática no município de Petrolina-PE entre os anos de 1973-2021. **Revista de Geografia**, Juiz de Fora, v. 12, n. 2, p. 282-303, 2022.

PONZONI, Flávio Jorge *et al.* **Calibração de sensores orbitais**. Oficina de Textos, v. 3, f. 46, 2015. 92 p.

QI, J.; CHEHBOUNI, A.; HUETE, A. R.; KERR, Y. H.; SOROOSHIAN, S. **A modified soil adjusted vegetation index**. Remote Sensing of Environment, v. 48, n. 2, p. 119-126, 1994. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/223906415_A_Modified_Soil_Adjusted_Vegetation_Index. Acesso em: 06 ago. 2025.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. **Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS**. In: Proceedings of the Earth

Resources Technology Satellite-1 Symposium, Volume I: Technical Presentations, NASA SP-351, 1973, p. 309-317.

SILVA, Bernardo Barbosa da (Org) et al. **APLICAÇÕES AMBIENTAIS BRASILEIRAS COM GEOPROCESSAMENTO E SENSORIAMENTO REMOTO**. CAMPINA GRANDE: Editora da Universidade Federal de Campina Grande - EDUFCG, 2013. 214 p.

STEFFEN, CARLOS ALBERTO. **INTRODUÇÃO AO SENSORIAMENTO REMOTO**. INPE. Disponível em:

<http://www3.inpe.br/unidades/cep/atividadescep/educasere/apostila.htm>. Acesso em: 25 jan. 2025.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). Landsat Missions: Overview. 2021. Disponível em: <https://www.usgs.gov/landsat-missions>. Acesso em: 22 jun. 2025.

USGS. **Landsat 8**. usgs. Disponível em: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8>. Acesso em: 6 mar. 2025.

USGS. **Landsat Satellite Missions**. Disponível em: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-satellite-missions>. Acesso em: 26 jan. 2025.