UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

MARIA VITÓRIA SILVA FELIX DE ANDRADE

TELHADOS VERDES: AVALIAÇÃO DO SEU PAPEL NA REDUÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANAS EM RECIFE - PE

Recife
2025

MARIA VITÓRIA SILVA FELIX DE ANDRADE

TELHADOS VERDES: AVALIAÇÃO DO SEU PAPEL NA REDUÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANAS EM RECIFE - PE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador (a): Prof. Dr. Anderson Luiz Ribeiro de Paiva

Coorientador (a): Profa. Haylla Rebeka de Albuquerque Lins Leonardo

Recife

2025

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

Andrade, Maria Vitória Silva Felix de.
Telhados verdes: avaliação do seu papel na redução das ilhas de calor urbanas em Recife - PE / Maria Vitória Silva Felix de Andrade. - Recife, 2025.
49 : il., tab.

Orientador(a): Anderson Luiz Ribeiro de Paiva
Cooorientador(a): Haylla Rebeka de Albuquerque Lins Leonardo
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Civil - Bacharelado, 2025.
Inclui referências.

1. Python. 2. Sensoriamento Remoto. 3. Telhados Verdes. I. Paiva, Anderson Luiz Ribeiro de. (Orientação). II. Leonardo, Haylla Rebeka de Albuquerque Lins . (Coorientação). IV. Título.

620 CDD (22.ed.)

SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
COORDENAÇÃO DO CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ATA DA DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO PARA CONCESSÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO CIVIL

CANDIDATO: – Maria Vitória Silva Felix de Andrade

BANCA EXAMINADORA:
Orientador: Anderson Luiz Ribeiro de Paiva
Coorientador: Haylla Rebeka de Albuquerque Lins Leonardo

Examinador 1: Sylvana Melo dos Santos
Examinador 2: Debora Natália Oliveira de Almeida

TÍTULO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO:
Telhados verdes: avaliação do seu papel na redução das ilhas de calor urbanas em Recife – PE

LOCAL: Sala do Laboratório de Geoprocessamento
DATA: 29/04/2025 **HORÁRIO DE INÍCIO**: 13:00 horas**.**

Em sessão pública, após exposição de cerca de 30 minutos, o(s) candidato(s) foi (foram) arguido(s) oralmente pelos membros da banca com NOTA: **10,0**.
1) (x) aprovado(s) (nota > = 7,0), pois foi demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização no tema da monografia e o texto do trabalho aceito.
As revisões observadas pela banca examinadora deverão ser corrigidas e verificadas pelo orientador no prazo máximo de 30 dias (o verso da folha da ata poderá ser utilizado para pontuar revisões).
O trabalho com nota no seguinte intervalo, **3,0 = < nota < 7,0,** será reapresentado, gerando-se uma nota ata; sendo o trabalho aprovado na reapresentação, o aluno será considerado **aprovado com exame final**.
2) ( ) reprovado(s). (nota <3,0)

Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da banca e pelo(s) candidato(s).

Recife, 29 de Abril de 2025

Orientador: ..... Documento assinado digitalmente gov.br ANDERSON LUIZ RIBEIRO DE PAIVA Data: 01/05/2025 15:40:46-0300 Verifique em https://validar.iti.gov.br

Coorientadora: ..... Documento assinado digitalmente gov.br HAYLLA REBEKA DE ALBUQUERQUE LINS LEONA Data: 01/05/2025 09:25:47-0300 Verifique em https://validar.iti.gov.br

Avaliador 1: .....

Avaliador 2: ..... Documento assinado digitalmente gov.br DEBORA NATALIA OLIVEIRA DE ALMEIDA Data: 02/05/2025 09:25:46-0300 Verifique em https://validar.iti.gov.br

Candidato: ..... Documento assinado digitalmente gov.br MARIA VITORIA SILVA FELIX DE ANDRADE Data: 01/05/2025 20:57:37-0300 Verifique em https://validar.iti.gov.br

Documento assinado digitalmente gov.br SYLVANA MELO DOS SANTOS Data: 02/05/2025 10:40:42-0300 Verifique em https://validar.iti.gov.br

Dedico este trabalho à minha família,
que sempre me apoiou e me inspirou.

AGRADECIMENTOS

Agradeço de coração à minha mãe, Elisangela Maria, pela força, amor incondicional e pelo exemplo de dedicação e perseverança. À minha família, especialmente aos meus irmãos Maria Beatriz, Danrlei e Daniel Gustavo, que sempre me apoiaram, me encorajaram e estiveram ao meu lado em cada passo dessa jornada. Ao meu sobrinho Benjamim Lucas, que trouxe alegria e renovou minha energia durante os momentos mais difíceis. Ao meu pai, Cícero.

Agradeço ao meu namorado, Gustavo Lima, por sua paciência, compreensão e apoio constante, que foram fundamentais em todos os momentos dessa caminhada.

Agradeço também ao meu orientador, Anderson Paiva, e à minha coorientadora, Haylla Leonardo, pela orientação, pelo conhecimento compartilhado e pela paciência durante todo o desenvolvimento deste trabalho. Suas contribuições foram essenciais para a realização deste TCC.

A Deus, Nossa Senhora e Santa Teresinha, por me guiarem e iluminarem meu caminho, concedendo-me força, fé e coragem para enfrentar os desafios e conquistar essa vitória.

Com amor e gratidão, agradeço a todos que fizeram parte dessa caminhada e tornaram esse momento possível.

“Nada é pequeno se feito com amor”
– Santa Teresinha do Menino Jesus.

RESUMO

O acelerado crescimento urbano tem intensificado as ilhas de calor e problemas de drenagem em cidades como Recife, onde a impermeabilização do solo e a redução de áreas verdes agravam inundações e geram desconforto térmico. Diante disso, esta pesquisa teve como objetivo avaliar a eficiência de telhados verdes no controle térmico e na retenção de águas pluviais, contribuindo para a mitigação desses impactos ambientais. Inicialmente, realizou-se o processamento digital de imagens de satélite OLI Landsat 8, para o cálculo dos índices espectrais Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), Índice de Diferença Normalizada para Áreas Construídas (NDBI) e Built-Up, e mapeamento multitemporal da cobertura vegetal e da expansão urbana da cidade do Recife entre os anos de 2014 e 2024. Em seguida, foram analisadas séries históricas de dados meteorológicos — incluindo temperatura, precipitação, umidade relativa do ar e radiação solar — referentes ao período de 2005 a 2024, utilizando um algoritmo desenvolvido com linguagem de programação Python para tratamento e análise dos dados. Posteriormente, foram conduzidos experimentos na Unidade de Experimental de Telhados Ecológicos do Recife (UETER), para coletas de dados térmicos e hidrológicos do telhado verde e do telhado convencional. Os resultados evidenciaram que o telhado verde reduziu em até 2°C a temperatura interna em relação ao convencional, além disso, a análise de ilhas de calor via sensoriamento remoto demonstrou uma correlação direta entre o processo de urbanização acelerada, a diminuição de áreas vegetadas e a elevação das temperaturas superficiais na capital pernambucana.

Palavras-chave: Python, sensoriamento remoto, telhados verdes.

ABSTRACT

The rapid urban growth has intensified heat islands and drainage problems in cities like Recife, where soil impermeabilization and the reduction of green areas worsen flooding and create thermal discomfort. In light of this, this research aimed to evaluate the efficiency of green roofs in thermal regulation and stormwater retention, contributing to the mitigation of these environmental impacts. Initially, digital processing of OLI Landsat 8 satellite images was performed to calculate spectral indices Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Normalized Difference Built-up Index (NDBI), and Built-Up Index and to conduct multitemporal mapping of vegetation cover and urban expansion in Recife between 2014 and 2024. Subsequently, historical meteorological data series—including temperature, precipitation, relative humidity, and solar radiation—from 2005 to 2024 were analyzed using a Python-based algorithm for data processing and analysis. Later, experiments were conducted at the Experimental Unit of Green Roofs in Recife (UETER) to collect thermal and hydrological data from both green and conventional roofs. The results demonstrated that the green roof reduced indoor temperatures by up to 2°C compared to the conventional roof, delayed stormwater runoff by 2 minutes, and retained more water, proving its potential as a sustainable solution for urban planning in tropical climates.

Keywords: Python, remote sensing, green roofs.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Radiação solar incidente nos telhados e mecanismos de calor 23
Figura 2 - Retenção hídrica em telhado verde e convencional 24
Figura 3 - Localização do município de Recife e da UETER 26
Figura 4 - Unidade experimental de Telhado Ecológico do Recife 27
Figura 5 - Escort iMINI MX-IN-S-8-L 30
Figura 6 - NDVI do Recife nos anos de 2014 e 2024 31
Figura 7 - NDBI do Recife nos anos de 2014 e 2024 32
Figura 8 - Built Up do Recife nos anos de 2014 e 2024 33
Figura 9 - Trecho do código 34
Figura 10 - Temperatura média de Recife entre 2005 e 2024 35
Figura 11 - Precipitação pluviométrica em Recife entre 2005 e 2024 35
Figura 12 - Umidade relativa média em Recife entre 2005 e 2024 36
Figura 13 - Radiação global média em Recife entre 2005 e 2024 37
Figura 14 - Temperatura interna e externa ao longo do dia 21 de abril de 2021 38
Figura 15 - Temperatura interna e externa ao longo do dia 21 de abril de 2024 39
Figura 16 - Temperatura interna e externa ao longo do dia 22 de abril de 2021 39
Figura 17 - Temperatura interna e externa ao longo do dia 22 de abril de 2024 40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados das imagens selecionadas.....27
Tabela 2 - Especificações das Bandas do Sensor Landsat 8 28
Tabela 3 - Datas selecionadas para análise detalhada da temperatura nos telhados.....37

LISTA DE ABREVIATURAS

MIR	Reflectância da banda equivalente ao infravermelho próximo
NIR	Reflectância da banda equivalente ao infravermelho próximo
Red	Reflectância da banda equivalente ao vermelho
Tmax	Temperatura máxima
Tmed	Temperatura média
Tmin	Temperatura mínima

LISTA DE SIGLAS

BU	Índice de Construção
CTG	Centro de Tecnologia e Geociências
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia E Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
NDBI	Índice de Diferença Normalizada para Áreas Construídas
NDVI	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada
UETER	Unidade Experimental de Telhado Ecológico do Recife
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco

SUMÁRIO

1	**INTRODUÇÃO**	16
1.1	OBJETIVOS	17
1.1.1	Objetivo geral	17
1.1.2	Objetivos específicos	17
1.2	JUSTIFICATIVAS	18
2	**REFERÊNCIAL TEÓRICO**	19
2.1	Sensoriamento remoto	19
2.2	Telhados verdes	20
2.2.1	Tipologias de telhados verdes	20
2.2.2	Vantagens e desvantagens	22
2.2.3	Benefícios dos telhados verdes	22
2.3	Linguagem de programação	25
3	**METODOLOGIA**	26
3.1	Área de estudo	26
3.1.1	Unidade Experimental de Telhados Ecológicos do Recife (UETER)	26
3.2	Sensoriamento remoto	27
3.2.1	Processamento	28
3.3	Obtenção dos dados meteorológicos	29
3.4	Coleta dos dados de temperatura ambiente internadas coberturas	29
4	**RESULTADOS E DISCUSSÕES**	31
4.1	Identificação de ilhas de calor em Recife	31
4.2	Algoritmo para a análise dos dados	33
4.3	Análise dos dados externos	34
4.4	Análise dos dados internos do telhado verde	37
5	**CONCLUSÃO**	42

REFERÊNCIAS.....43

1 INTRODUÇÃO

De acordo com Tucci (2002), o crescimento da população urbana tem se intensificado de forma expressiva no Brasil nas últimas décadas, culminando na consolidação de grandes metrópoles em praticamente todas as capitais estaduais. Cidades com mais de 1 milhão de habitantes apresentam uma taxa média anual de crescimento populacional de 0,9%, enquanto os centros regionais, com população entre 100 mil e 500 mil habitantes, registram um crescimento médio anual de 4,9%. Ainda segundo o autor, os processos de urbanização inadequados e os impactos ambientais previamente identificados nas Regiões Metropolitanas vêm sendo replicados nas cidades de médio porte, ampliando os desafios relacionados ao ordenamento territorial e à sustentabilidade urbana.

A ocupação das áreas urbanas tem efeitos ambientais significativos, especialmente no que diz respeito às mudanças no ciclo hidrológico e à intensa impermeabilização do solo. Isso leva a um aumento, tanto na frequência quanto na gravidade, dos eventos de inundação nas cidades, resultando em danos materiais, patrimoniais e humanos (Teixeira; Araujo, 2023)

As áreas urbanas são tipicamente constituídas por materiais como concreto, telhados e asfalto, que têm um baixo valor de albedo. Isso significa que esses materiais apresentam menor capacidade de refletir a radiação solar e maior capacidade de absorver a radiação, contribuindo para o fenômeno conhecido como ilha de calor urbana, de acordo com Costa *et al.* (2010). Gartland (2010) define as ilhas de calor nas áreas urbanas e suburbanas como "oásis inversos", onde as temperaturas do ar e da superfície são mais altas em comparação com as regiões rurais circundantes.

A partir de 2013 entrou em vigor a NBR 15575-1 (ABNT, 2013), norma que define os critérios necessários para garantir o bom desempenho térmico das edificações. Durante o verão, a máxima temperatura do ar no interior de ambientes de permanência prolongada, como salas e dormitórios, sem a influência de fontes internas de calor, deve ser igual ou inferior ao valor máximo da temperatura externa. No inverno, a temperatura mínima dentro dos ambientes de permanência prolongada deve ser sempre superior ou igual à temperatura mínima externa acrescida de 3°C.

Diante disso, os telhados verdes surgiram como uma ferramenta para alcançar um maior conforto térmico nas edificações. De acordo com Vilarim (2022), esse tipo de cobertura oferece temperaturas mais amenas durante as horas mais quentes do dia e temperaturas mais elevadas durante as horas mais frias do dia.

Os telhados verdes melhoram a qualidade do ar, reduzem o efeito de ilha de calor urbana, aumentam a biodiversidade e gerenciam eficazmente as águas pluviais. Além disso, contribuem para o bem-estar psicológico dos habitantes urbanos, proporcionando espaços verdes tranquilos em meio à paisagem frequentemente árida das cidades (Silva; Oliveira, 2024).

O telhado verde exibe impactos hidrológicos positivos, sendo eficaz na redução do escoamento superficial. Durante a estação chuvosa, ele demonstra altos índices de abstração hidrológica, destacando sua importância para regiões suscetíveis a inundações ao aliviar as demandas dos sistemas de drenagem urbana convencionais (Moura, 2023).

1.1 OBJETIVOS

Neste tópico serão mencionados os objetivos gerais e específicos do presente trabalho.

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar o desempenho térmico dos telhados verdes como uma medida para mitigar as ilhas de calor urbanas na cidade do Recife.

1.1.2 Objetivos específicos

- Avaliar a ocorrência de ilhas de calor na região metropolitana do recife por meio do uso de sensoriamento remoto;
- Avaliar estatisticamente a série histórica de dados meteorológicos de Recife;
- Comparar a temperatura no interior dos telhados verde e convencional (laje) com a temperatura externa;
- Criar uma rotina em linguagem de programação Python para potencializar os cálculos estatísticos e a geração de gráficos;

1.2 JUSTIFICATIVAS

Em um cenário em que a preocupação com questões climáticas e ambientais ganha cada vez mais relevância, a adoção de técnicas construtivas voltadas para uma construção civil sustentável se mostra imperativa. Nesse contexto, a necessidade de aprofundar os estudos sobre a implementação de telhados verdes como uma opção viável se faz evidente. Esses telhados não apenas têm o potencial de reduzir as temperaturas em áreas urbanas e no interior das edificações, mas também podem desempenhar um papel crucial como filtros biológicos, na redução da poluição do ar e no fortalecimento do sistema de drenagem urbana (Oliveira, 2019).

A promulgação da Lei nº 18.112/2015 pela Prefeitura do Recife marcou um importante avanço na legislação das novas edificações. Esta lei tornou obrigatória a implementação de telhados verdes na cidade, representando não apenas uma medida para reduzir as ilhas de calor, mas também para auxiliar na drenagem e no aproveitamento das águas pluviais. Além disso, os telhados verdes contribuem para a criação de um sistema de resfriamento nas edificações.

Alguns autores, como Oliveira (2009) e Alves *et al*. (2021), conduziram pesquisas sobre a utilização de telhados verdes, comparando-os com outras formas de cobertura, com o objetivo de analisar seu desempenho térmico. Os resultados destacaram que os telhados verdes apresentam resultados positivos como solução para aprimorar o desempenho térmico das edificações.

Os telhados verdes são uma solução inovadora e eficaz para enfrentar desafios ambientais e sociais nas cidades modernas. Eles melhoram a sustentabilidade urbana, a qualidade de vida e a resiliência às mudanças climáticas, tornando-se uma escolha estratégica crucial para o desenvolvimento urbano futuro. Pesquisas para otimizar técnicas de construção e manutenção, assim como a conscientização sobre suas vantagens, são essenciais para promover sua adoção em larga escala (Cirqueira *et al*., 2024).

2 REFERÊNCIAL TEÓRICO

2.1 Sensoriamento remoto

O sensoriamento remoto tem se mostrado uma ferramenta promissora para avaliar o desempenho e a distribuição dos telhados verdes em larga escala. Ao permitir a análise da superfície urbana sem a necessidade de contato direto, essa tecnologia facilita o monitoramento de variáveis como cobertura vegetal e temperatura superficial, fornecendo dados essenciais para o planejamento urbano e a expansão de práticas sustentáveis (Leonardo, 2019).

A aplicação do sensoriamento remoto possibilita a obtenção de dados sobre a superfície da Terra e os fenômenos que nela acontecem sem o contato físico direto. Esse método funciona através da captação e análise da radiação eletromagnética refletida ou emitida pelos objetos, utilizando sensores posicionados em plataformas aéreas ou espaciais, como satélites e aeronaves (Lillesand; Kiefer, 1999).

De acordo com Jensen (2006), o sensoriamento remoto é uma técnica de observação que permite a coleta de informações sobre objetos ou regiões a partir de uma certa distância, sendo especialmente valiosa para o monitoramento ambiental, a gestão de recursos naturais e a análise de áreas urbanas. Essa técnica integra conhecimentos de diversas disciplinas, como física, geografia e ciência da computação, para o processamento e a interpretação dos dados obtidos.

Sendo viabilizado por uma diversidade de tecnologias e equipamentos que permitem a coleta e a análise de informações sobre a superfície terrestre. Esses equipamentos geralmente estão instalados em plataformas orbitais, como satélites, ou em plataformas aéreas, como aviões e drones. As tecnologias de sensoriamento remoto podem ser divididas principalmente em sensores passivos e ativos, cada um com características e aplicações específicas (Jensen, 2006). Os sensores passivos captam a radiação eletromagnética refletida ou emitida pela superfície terrestre, que normalmente provém de uma fonte externa, como o Sol (Campbell; Wynne, 2011). Por outro lado, os sensores ativos emitem sua própria energia e medem a radiação que é refletida de volta para o sensor (Richards, 2013).

O sensoriamento remoto tem se consolidado como uma ferramenta essencial na análise e monitoramento das transformações ambientais e urbanas. Dentre as técnicas empregadas, destacam-se os índices espectrais, que permitem a extração de informações específicas sobre a cobertura e uso do solo a partir de imagens de satélite. Três índices amplamente utilizados nesse contexto são: Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), Índice de Área Construída por Diferença Normalizada (NDBI) e o Índice *Built-up*.

Segundo Huete *et al*. (2002), o NDVI é um indicador que mede a densidade e a saúde da vegetação em uma determinada área. Já o NDBI, conforme proposto por Zha *et al*., (2003), é utilizado para identificar e mapear áreas urbanizadas ou construídas. O Índice *Built-up*, por sua vez, foi desenvolvido para aprimorar a identificação de áreas urbanizadas, buscando superar limitações do NDBI, especialmente em áreas com materiais de cobertura semelhantes aos de superfície natural. Estudos comparativos, como o de Costa *et al*. (2018), analisam a eficiência do *Built-up* em relação ao NDBI na classificação de áreas urbanas em imagens do sensor Landsat 8.

Sakuno *et al*. (2017) também contribuíram com essa abordagem ao estimar superfícies impermeáveis em São José dos Campos-SP, utilizando os índices NDBI, NDVI e *Built-up*. O estudo destacou a eficácia desses índices no mapeamento de áreas urbanas, sobretudo na distinção entre zonas vegetadas e construídas.

2.2 Telhados verdes

A integração das técnicas de sensoriamento remoto possibilita a identificação de áreas propícias à implementação de telhados verdes, a quantificação do seu impacto na mitigação de efeitos climáticos adversos, como ilhas de calor urbanas, e viabiliza o acompanhamento sistemático de sua eficácia ao longo do tempo (Wu; Biljecki, 2011).

Esses sistemas têm a capacidade de transformar coberturas convencionais em áreas versáteis, promovendo a inserção da vegetação no ambiente construído e contribuindo para a sustentabilidade urbana. Países como a Alemanha se destacam na adoção dessa solução, sendo considerados referência internacional na implementação de políticas públicas voltadas à sua difusão. Em 2002, mais de 12% das coberturas planas alemãs já contavam com algum tipo de cobertura verde (Harzmann, 2001 *apud* Carter; Butler, 2008).

2.2.1 Tipologias de telhados verdes

Os telhados verdes podem ser classificados em três categorias principais: extensivos, semi-intensivos e intensivos. Essa divisão é baseada principalmente na espessura da camada de substrato e no nível de manutenção exigido, que varia desde baixa (extensivos) até alta (intensivos), com os semi-intensivos exigindo cuidados periódicos, como destacado por Almeida (2020).

Nos telhados verdes intensivos, as plantas podem atingir uma profundidade de 15 cm a 90 cm, permitindo a inclusão de espécies de maior porte (Sousa *et al*., 2020). Dependendo do conceito adotado, podem ser utilizados para atividades esportivas, recreativas e de lazer, sendo frequentemente semelhantes a jardins naturais em termos de aparência. Os telhados intensivos, em geral, demandam um sistema de irrigação, aproveitando a água retida na drenagem para manter as plantas cultivadas. Embora sejam considerados a melhor opção para o controle do escoamento pluvial, sua aplicação é limitada na maioria dos casos devido à sobrecarga estrutural. Além disso, não são adequados para telhados inclinados e exigem um nível de manutenção similar ao de jardins convencionais (Tassi *et al*., 2014).

Conforme Sousa *et al*. (2020), os telhados verdes extensivos são cobertos por plantas de baixo peso, resistentes e adaptáveis a condições climáticas adversas, como períodos de estiagem, invernos rigorosos e ventos fortes. Esse tipo de telhado suporta vegetação de pequeno porte, predominantemente herbácea, sendo a forma mais simples do sistema. Além de exigir pouca manutenção, apresenta uma carga reduzida sobre a estrutura, geralmente de até 170 kg/m², o que, na maioria dos casos, dispensa a necessidade de reforço estrutural na edificação (Heneine, 2008).

A água necessária para as plantas é normalmente armazenada no substrato, e a camada de drenagem ou retenção é suficiente para atender às suas necessidades hídricas. No entanto, durante períodos de estiagem prolongada, pode ser necessário o uso de um sistema de irrigação para garantir a sobrevivência da vegetação (Tassi *et al*., 2014).

Segundo Souza *et al*. (2020), o telhado verde semi-intensivo é uma solução intermediária entre os sistemas extensivo e intensivo, combinando características de ambos. Esse tipo de cobertura possui uma camada de substrato com espessura variando entre 12 e 25 cm, o que permite o cultivo de uma diversidade maior de plantas, como gramíneas, herbáceas e pequenos. Devido a essa composição, o sistema apresenta um peso adicional considerável na estrutura da edificação, com uma carga que varia entre 120 e 200 kg/m², o que exige uma avaliação criteriosa da capacidade de suporte da construção.

Ainda conforme Souza *et al.* (2020), o telhado verde semi-intensivo demanda manutenção periódica e irrigação ocasional, em razão da variedade de espécies vegetais utilizadas. Entre os principais benefícios ambientais proporcionados por essa tipologia destacam-se a maior retenção de água pluvial, a melhoria do conforto térmico e acústico e a contribuição para a biodiversidade urbana. Para garantir a eficiência e sustentabilidade do sistema, é fundamental considerar, durante a implantação, aspectos como a estrutura do edifício, o regime de chuvas da região e a escolha de espécies vegetais adequadas ao clima local.

2.2.2 Vantagens e desvantagens

Diversos estudos destacam as vantagens dos telhados verdes, evidenciando seus benefícios ambientais, econômicos e sociais. Teixeira (2017) realizou uma comparação entre a qualidade da água escoada de telhados verdes e convencionais, constatando que os sistemas com vegetação apresentaram menor acidez e maior presença de nitrogênio, o que indica uma melhoria na qualidade da água pluvial.

No que diz respeito ao conforto térmico, Frizon *et al*. (2018) apontam que os telhados verdes são capazes de atenuar os picos de temperatura e aumentar a umidade nas edificações durante os períodos mais quentes do ano, tornando os ambientes mais agradáveis para os usuários. Essa modulação térmica pode, inclusive, reduzir a necessidade do uso de equipamentos de refrigeração, contribuindo para a economia de energia. Além desses aspectos, os telhados verdes também desempenham um papel relevante na promoção da biodiversidade em ambientes urbanos. Eles criam habitats que podem ser utilizados por diversas espécies de insetos, aves e outros pequenos animais, contribuindo para a manutenção e incremento da fauna local. Um estudo de Oliveira *et al.* (2021) destaca que o uso de espécies nativas em telhados verdes potencializa a atração de polinizadores e outros organismos benéficos, fortalecendo os ecossistemas urbanos.

Apesar de seus inúmeros benefícios, é importante considerar também os desafios associados à adoção dessa tecnologia. Santos (2018), Rocha (2020) e Rodrigues e Cabral (2020) destacam algumas desvantagens dos telhados verdes. A instalação desse tipo de sistema requer mão de obra especializada, tanto na fase de planejamento quanto na execução, o que pode elevar a complexidade do projeto. Além disso, existe o risco de infestação por pragas, sendo que, em determinados casos, o consumo da vegetação cultivada não é recomendado. Outro ponto a ser considerado é o custo inicial elevado, o que pode representar um obstáculo para sua adoção em larga escala. Por fim, a diversidade de espécies vegetais e o aumento de carga sobre a estrutura exigem cuidados específicos de manutenção para garantir o bom desempenho e a durabilidade do sistema.

2.2.3 Benefícios dos telhados verdes

Os telhados verdes oferecem benefícios significativos tanto no desempenho térmico quanto hidrológico das edificações. Estudos, como o de Casagrande *et al.* (2023) demonstram que a implementação dessas coberturas vegetadas contribui para a redução da temperatura interna dos edifícios, promovendo maior conforto térmico aos ocupantes. Além

disso, os telhados verdes são eficazes na retenção de águas pluviais, diminuindo o escoamento superficial e auxiliando na prevenção de enchentes urbanas.

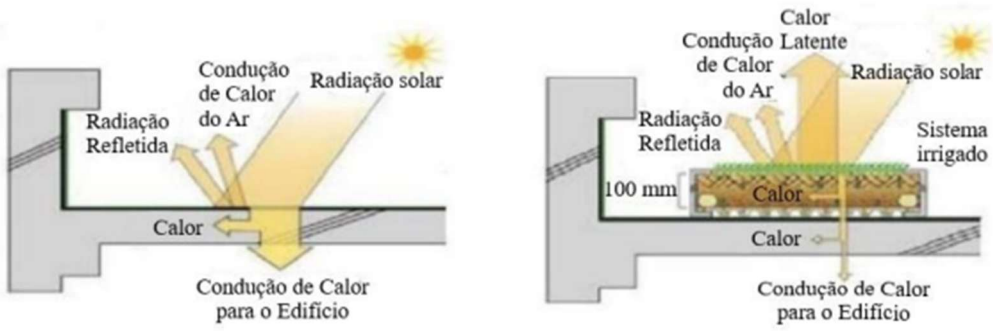
2.2.3.1 Benefícios térmicos

Telhados verdes demonstram uma capacidade de isolamento térmico superior em relação às coberturas cerâmicas. Conforme observado por Ferraz (2012), durante as horas mais quentes do dia, os telhados verdes mantem a temperatura interna da edificação mais baixa do que a externa, enquanto nas horas mais frias, a temperatura interna permanece acima da externa — um comportamento que não é observado nas coberturas de telha cerâmica.

De acordo com Neves (2023), o telhado verde demonstra uma notável estabilidade térmica, absorvendo eficientemente a radiação solar, mesmo em dias ensolarados, e mantendo a temperatura interna da edificação estável. Mesmo em períodos de chuva, essa estabilidade é mantida, evidenciando a capacidade do telhado verde de proporcionar um desempenho térmico consistente e confortável, independentemente das variações de temperatura externa.

A comparação entre um telhado convencional e um telhado com vegetação, ilustrada na Figura 1, reforça esses dados. Observa-se que o telhado convencional absorve a radiação solar diretamente, resultando em maior condução de calor para o interior do edifício. Já no telhado verde, a vegetação e o substrato atuam como barreiras térmicas naturais: parte da radiação é refletida, parte é absorvida e dissipada por evapotranspiração (liberando calor latente), e a condução de calor para o interior é significativamente reduzida. Além disso, o sistema irrigado e a camada de substrato aumentam o isolamento térmico, promovendo um ambiente interno mais fresco e energeticamente eficiente. Essa comparação evidencia o potencial dos telhados verdes como estratégia passiva de mitigação do calor urbano e melhoria da eficiência energética nas edificações conforme Silva *et al.* (2016).

Figura 1 - Radiação solar incidente nos telhados e mecanismos de calor



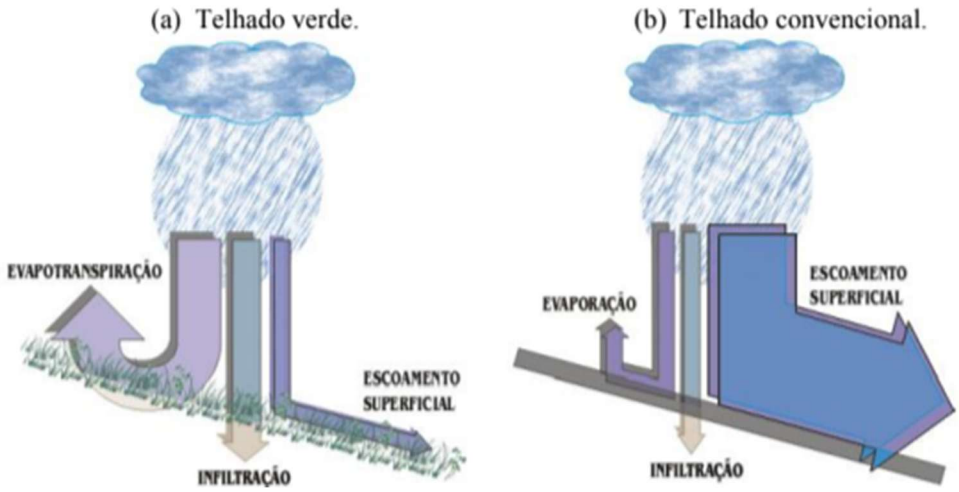
Fonte: Silva *et al.* (2016).

2.2.3.2 Benefícios hidrológicos

De acordo com Chagas e Calheiros (2023), a camada de substrato em telhados verdes é capaz de absorver e reter a água da chuva, diminuindo o volume de água que escoa diretamente do telhado. Essa função é crucial, pois o escoamento superficial descontrolado pode causar problemas como a erosão do solo, a contaminação de recursos hídricos locais e a sobrecarga dos sistemas de drenagem urbana. Devido à presença de vegetação e solo, o escoamento da água da chuva em telhados verdes é significativamente retardado e reduzido em comparação com telhados convencionais, o que diminui consideravelmente o risco de alagamentos e inundações (Giacomello; Gaspari, 2021).

A Figura 2 ilustra essa diferença no comportamento hidrológico entre os dois sistemas. No telhado verde, parte da água é retida no substrato e na vegetação, promovendo processos como infiltração e evapotranspiração, que ajudam a controlar o volume e a velocidade do escoamento superficial. Já no telhado convencional, devido à superfície impermeável, a maior parte da água pluvial escorre diretamente, com pouca infiltração e limitada evaporação, resultando em maior volume de escoamento e maior risco de sobrecarga das redes pluviais. Essa comparação visual reforça a eficácia dos telhados verdes como solução sustentável para o manejo das águas urbanas, conforme Ohnuma Júnior (2008).

Figura 2 - Retenção hídrica em telhado verde e convencional



Fonte: Ohnuma Júnior (2008).

2.3 Linguagem de programação

No contexto da disseminação e análise de tecnologias sustentáveis como os telhados verdes o uso de ferramentas computacionais tem se mostrado fundamental. A aplicação de linguagens de programação como o Python permite a modelagem, simulação e análise de dados relacionados ao desempenho térmico e escoamento pluvial desses sistemas (Silva, 2018).

Python é uma linguagem de programação de alto nível amplamente reconhecida por suas diversas características que a tornam popular entre os desenvolvedores. Desenvolvido com a filosofia de que o código deve ser fácil de ler e escrever, Python possui uma sintaxe clara e intuitiva, o que facilita tanto o aprendizado quanto a manutenção do código, permitindo que desenvolvedores de diferentes níveis de experiência a utilizem com eficiência (Van Rossum; Drake, 2009).

A linguagem se tornou a preferida para ciência de dados e aprendizado de máquina, devido à sua extensa coleção de bibliotecas especializadas, *como NumPy, Pandas, Matplotlib e Scikit-learn*. Essas bibliotecas possibilitam a manipulação eficiente de dados, visualização e implementação de algoritmos de aprendizado de máquina (McKinney, 2017).

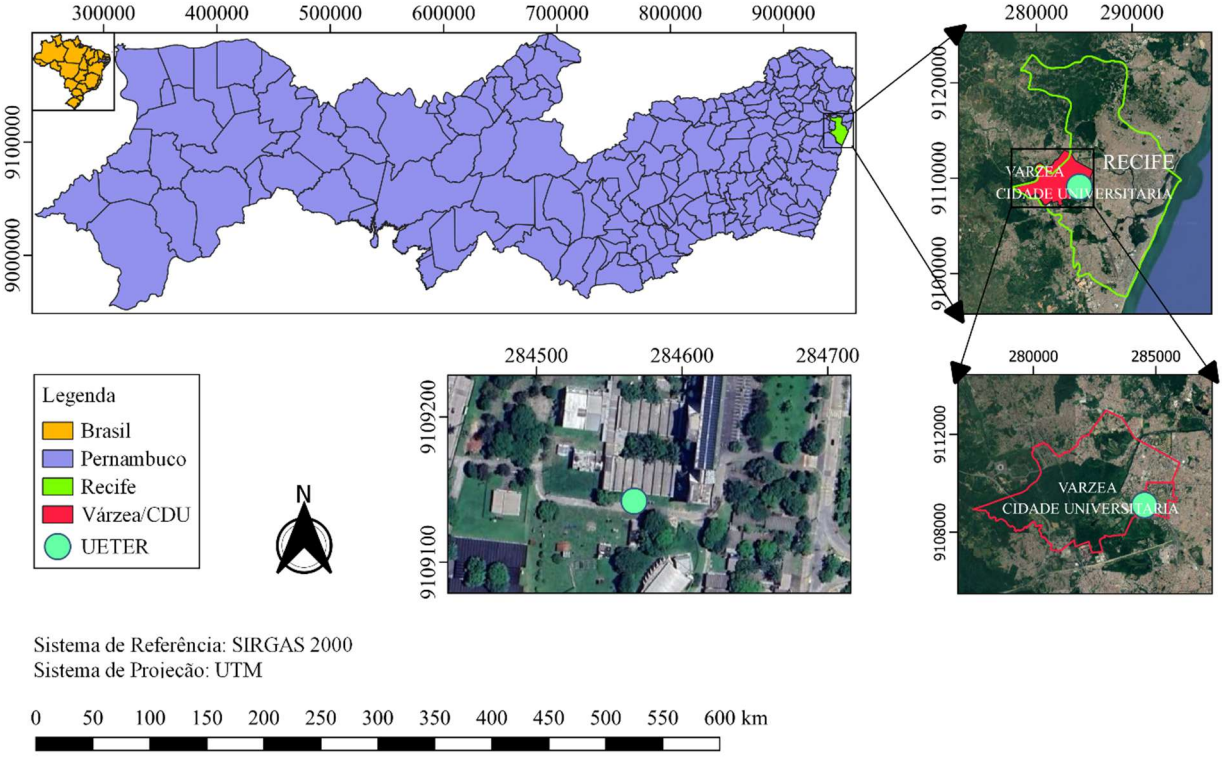
Além disso, Python é frequentemente utilizado para automação de tarefas repetitivas e *scripting*. Sua sintaxe simples e a disponibilidade de bibliotecas como *Selenium* e *BeautifulSoup* facilitam a automação de tarefas, como *web scraping*, testes automatizados e manipulação de arquivos (Mitchell, 2018).

3 METODOLOGIA

3.1 Área de estudo

Os telhados analisados neste estudo estão localizados na Unidade Experimental de Telhados Ecológicos do Recife (UETER), que situa-se no Centro de Tecnologia e Geociências (CTG) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), na cidade do Recife, no bairro da Várzea, conforme Figura 3. A cidade do Recife está situada na região Nordeste do Brasil, no estado de Pernambuco, o clima local é classificado como tropical úmido, apresentando uma temperatura média anual de 26ºC e uma estação chuvosa que ocorre entre março e julho, conforme IBGE (2022).

Figura 3 - Localização do município de Recife e da UETER



Fonte: Autora (2025).

3.1.1 Unidade Experimental de Telhados Ecológicos do Recife (UETER)

A Unidade Experimental de Telhado Ecológico do Recife (UETER) está localizada na parte posterior do Centro de Tecnologia e Geociências (CTG) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), conforme mostrado na Figura 4. Para este estudo, foram utilizadas as

células teste 4 e 5, correspondentes ao telhado convencional (laje) e ao telhado verde, respectivamente.

Figura 4 - Unidade experimental de Telhado Ecológico do Recife

Fonte: Autora (2025).

3.2 Sensoriamento remoto

Para a caracterização da área de estudo, foram utilizadas imagens do satélite *Operational Land Imager* (OLI) Landsat 8, com o objetivo de analisar a cobertura do solo e identificar possíveis ilhas de calor urbanas. As imagens foram obtidas por meio da plataforma *Earth Explorer*, sendo selecionadas com base em critérios de baixa cobertura de nuvens, a fim de assegurar maior qualidade e precisão nas análises, especialmente nos períodos definidos pelo recorte temporal da pesquisa. As datas escolhidas para a comparação foram 23 de março de 2014 e 4 de março de 2024, conforme explicitado na Tabela 1. As informações referentes aos dados do sensor estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 1 - Dados das imagens selecionadas

Data	Hora (UTM)	Angulo solar	Orbita	Ponto
25/03/2014	12:29:22	59,32	214	65
04/03/2024	12:28:59	59.31	214	65

Fonte: Autora (2025).

Tabela 2 - Especificações das Bandas do Sensor Landsat 8

Sensor	Banda Espectral	Resolução Espectral (µm)	Resolução Espacial	Resolução Temporal	Área Imageada	Resolução Radiométrica
OLI	B1 - Azul Costeiro	0.43 - 0.45	30 m	16 dias	170 × 183 km	16 bits
	B2 - Azul	0.45 - 0.51	30 m		-	-
	B3 - Verde	0.53 - 0.59	30 m		-	-
	B4 - Vermelho	0.64 - 0.67	30 m		-	-
	B5 - Infravermelho Próximo	0.85 - 0.88	30 m		-	-
	B6 - Infravermelho Médio 1	1.57 - 1.65	30 m		-	-
	B7 - Infravermelho Médio 2	2.11 - 2.29	30 m		-	-
	B8 - Pancromática	0.50 - 0.68	15 m		-	-
	B9 - Cirrus	1.36 - 1.38	30 m		-	-
TIRS	B10 - Infravermelho Termal 1	10.6 - 11.19	100 m	16 dias	170 × 183 km	16 bits
	B11 - Infravermelho Termal 2	11.5 - 12.51	100 m		-	-

Fonte: A Autora (2025), adaptado de Engesat (2015).

3.2.1 Processamento

Segundo o estudo de Liu e Huete (1995), Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) é calculado com base na absorção da radiação de luz vermelha (RED) pela clorofila e no espalhamento da radiação de infravermelho próximo (NIR) causado pelas folhas das plantas. Os valores variam de -1 a +1, sendo que valores próximos de +1 correspondem a vegetação de maior densidade, como florestas, enquanto valores entre 0 e -1 indicam áreas como solo exposto. O cálculo do NDVI é feito pela seguinte Equação 1:

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

Onde: NIR = reflectância da banda equivalente ao infravermelho próximo

RED = reflectância da banda equivalente ao vermelho

O Índice de Diferença Normalizada para Áreas Construídas (NDBI), representado na Equação 2, identifica áreas impermeáveis, como zonas urbanas, através da diferença entre as bandas de infravermelho próximo (NIR) e infravermelho médio (MIR). Seus valores variam de -1 a +1, com valores próximos de +1 indicando áreas urbanizadas e próximos de -1 indicando áreas não construídas.

$$NDVI = \frac{MIR - NIR}{MIR + NIR} \quad (2)$$

Onde: NIR = reflectância da banda equivalente ao infravermelho próximo

MIR = reflectância da banda equivalente ao Infravermelho médio

Desenvolvido por He *et al*. (2010), o índice de construção (BU) integra o NDVI e o NDBI, permitindo distinguir de maneira mais precisa entre áreas de solo exposto, edificações e vegetação. O Built Up é calculado através da Equação 3.

$$BU = NDBI - NDVI \quad (3)$$

3.3 Obtenção dos dados meteorológicos

A obtenção dos dados meteorológicos foi realizada a partir do banco de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), referente a estação meteorológica automática Recife (A301) para o período de 2005 a 2021. No entanto, essa estação encerrou a disponibilidade de dados no final de 2021. Dessa forma, foram considerados, também, os dados provenientes da estação meteorológica localizada na Unidade Experimental de Telhados Ecológicos do Recife, a qual iniciou suas operações em 2024. As variáveis consideradas neste estudo incluem temperatura, precipitação, umidade do ar e radiação solar.

3.4 Coleta dos dados de temperatura ambiente internadas coberturas

A coleta dos dados de temperatura interna nos telhados foi realizada utilizando Escort iMINI MX-IN-S-8-L (Figura 5), dispositivos programados para medir a temperatura a cada 30

minutos. Foram utilizados três Escort iMINI MX-IN-S-8-L em cada protótipo de telhado, cada um posicionado em uma parede diferente dos protótipos.

Figura 5 - Escort iMINI MX-IN-S-8-L

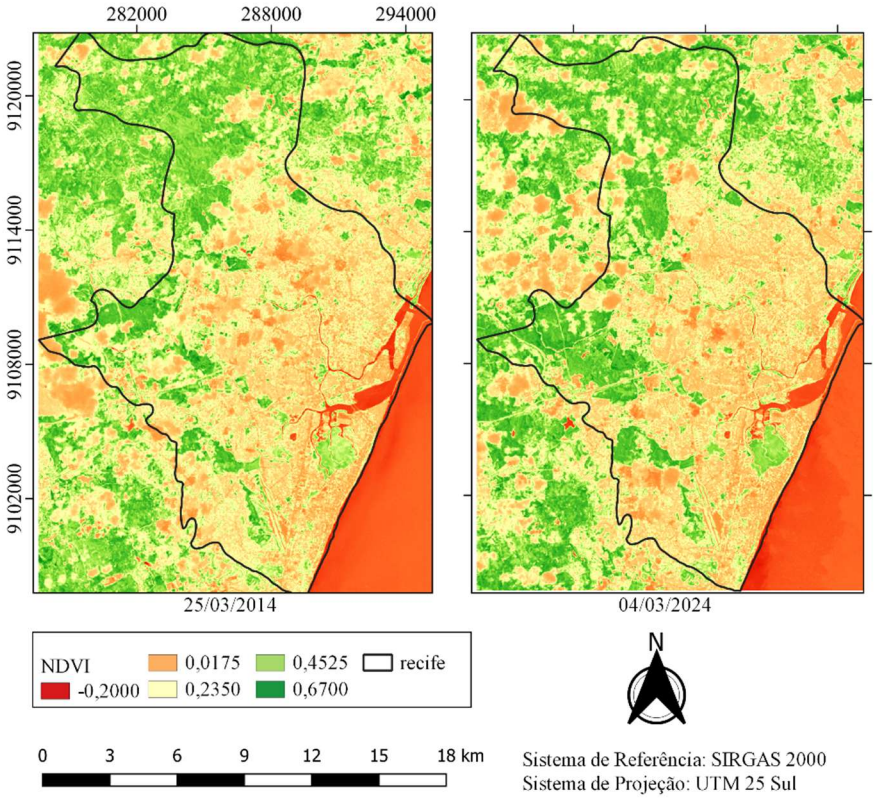
Fonte: Leonardo (2021).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Identificação de ilhas de calor em Recife

A análise temporal do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) permite avaliar as mudanças na cobertura vegetal ao longo dos anos, fornecendo subsídios importantes para a compreensão dos impactos da urbanização sobre o meio ambiente. Conforme ilustrado na Figura 6, no ano de 2014, verifica-se uma predominância de áreas com NDVI elevado, variando entre 0,4525 e 0,6700 (representadas em tons de verde), sobretudo nas regiões periféricas e ao norte da área analisada, indicando a presença expressiva de vegetação densa. Já em 2024, nota-se uma ampliação considerável das áreas com NDVI reduzido, com valores concentrados entre -0,2000 e 0,2350 (representadas em tons de vermelho, laranja e amarelo), especialmente nas zonas centrais e litorâneas. Essa variação indica uma tendência de perda da cobertura vegetal e sugere um processo de substituição da vegetação por superfícies urbanas impermeabilizadas, como edificações, vias asfaltadas e demais elementos característicos da malha urbana.

Figura 6 - NDVI do Recife nos anos de 2014 e 2024

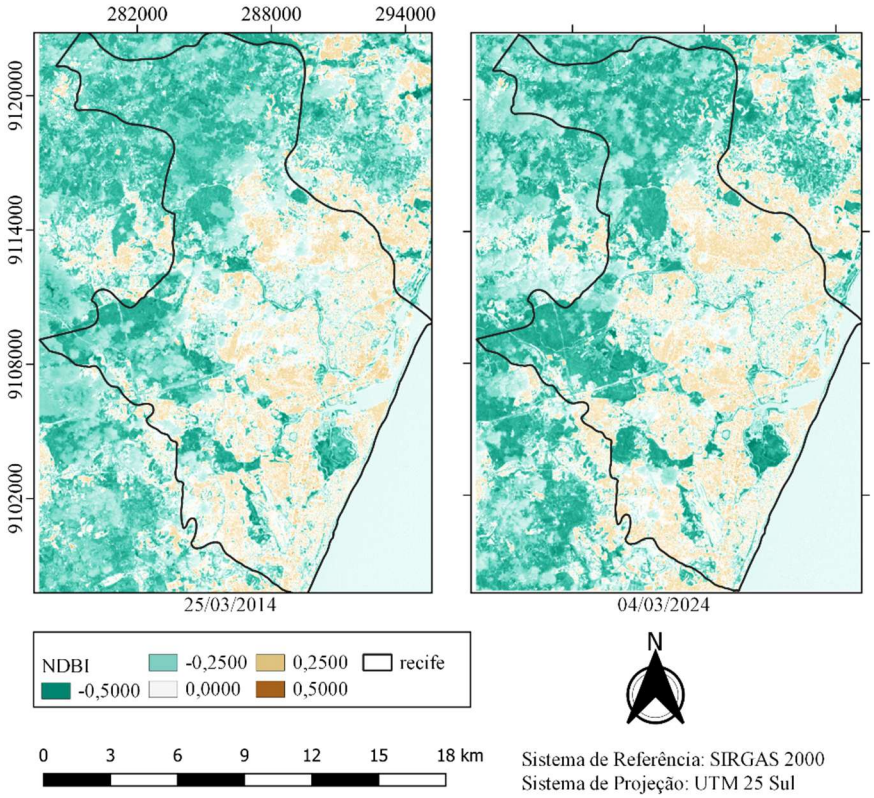


Fonte: Autora (2025).

A perda de vegetação pode comprometer diretamente a biodiversidade, a regulação térmica e a qualidade do solo, tornando essencial o monitoramento contínuo por meio de técnicas de sensoriamento remoto para embasar políticas de conservação ambiental e planejamento sustentável. Nesse contexto, estudos como o de Costa *et al*. (2010) demonstram a relevância do sensoriamento remoto na identificação de ilhas de calor e na análise dos impactos da urbanização sobre a temperatura superficial, reforçando a necessidade de estratégias de mitigação para minimizar os efeitos adversos da redução da vegetação.

Conforme mostrado na Figura 7, a análise comparativa entre os dois períodos revela um processo de expansão urbana. Em 2014, grande parte da área central e algumas porções periféricas apresentam valores predominantemente baixos de NDBI, indicando uma menor densidade de superfícies construídas. Já em 2024, observa-se um aumento expressivo das áreas com valores mais elevados de NDBI, especialmente nas regiões centrais e sudoeste do mapa. Esse crescimento pode estar associado à expansão da infraestrutura urbana e à substituição de superfícies naturais por materiais impermeáveis, como concreto e asfalto. Esse fenômeno intensifica o efeito das ilhas de calor urbanas (ICU), que ocorrem devido à maior absorção e retenção de calor em áreas construídas, conforme destacado por Oke (1982).

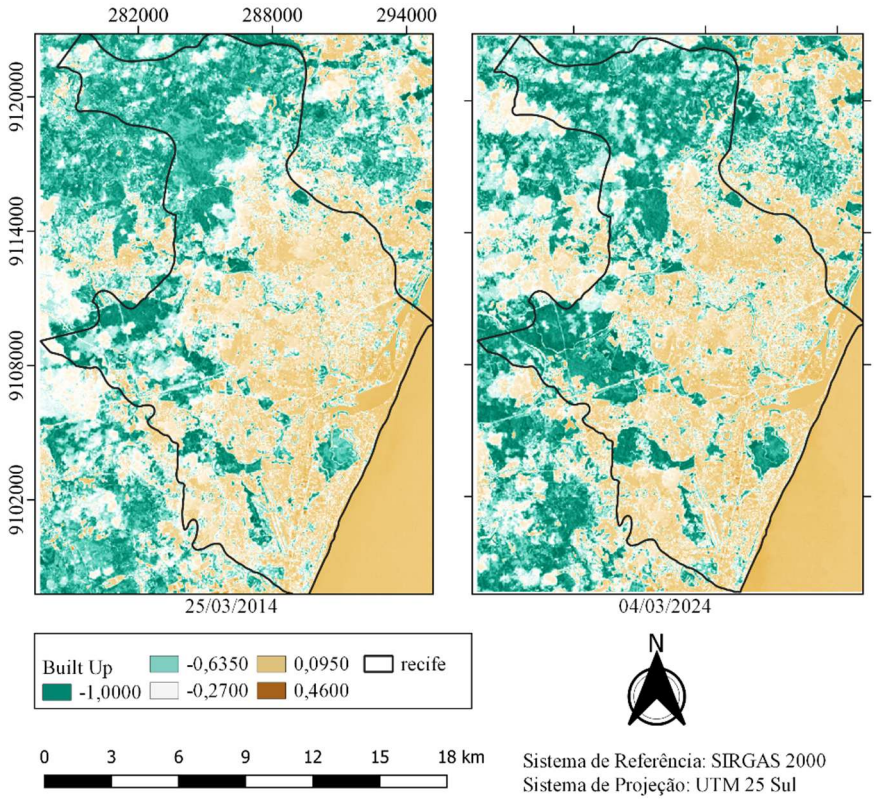
Figura 7 - NDBI do Recife nos anos de 2014 e 2024



Fonte: Autora (2025).

Conforme ilustrado na Figura 8, entre 2018 e 2024 houve uma dinâmica de urbanização em Recife, com valores variando entre -1,0000 (áreas não construídas, como vegetação ou solo exposto) e 0,4600 (áreas urbanizadas). A redução de valores negativos de BU ao longo do tempo reforça a perda de áreas naturais, o que pode elevar a temperatura superficial e alterar o microclima local. Estudos como o de Nóbrega e Vital (2010) demonstram que o processo de urbanização intensifica a formação de ilhas de calor urbanas, devido à substituição de superfícies vegetadas por materiais impermeáveis, resultando no aumento das temperaturas em áreas densamente construídas.

Figura 8 - Built Up do Recife nos anos de 2014 e 2024



Fonte: Autora (2025).

4.2 Algoritmo para a análise dos dados

Com o objetivo de automatizar os cálculos estatísticos dos dados e a elaboração de gráficos, foi desenvolvido um script de programação utilizando a linguagem Python (Figura 9). Ao contrário de planilhas eletrônicas convencionais, como Excel, que podem ser limitadas em termos de escalabilidade e repetitividade de processos, *Python* permite o processamento de grandes volumes de dados de forma muito mais rápida, precisa e automatizada. O script desenvolvido é capaz de importar o banco de dados e convertê-lo em um *DataFrame* — uma

estrutura eficiente de organização de dados bidimensionais oferecida pela biblioteca *Pandas*, que viabiliza operações complexas com poucas linhas de código.

Com essa abordagem, foi possível renomear, excluir e filtrar colunas por datas específicas com agilidade, além de calcular métricas estatísticas como média, mediana, desvio padrão, soma, e valores extremos de forma praticamente instantânea. Essa rapidez no tratamento e análise dos dados é fundamental para estudos com grandes séries temporais, como os relacionados a variáveis climáticas. Além disso, o uso de bibliotecas como *Matplotlib* e *Seaborn* permite a geração de gráficos altamente customizáveis — como boxplots, gráficos de linha e de barras — que são essenciais para a visualização clara e eficiente dos resultados.

Figura 9 - Trecho do código

```
#analise estatistica
escolha = str(input('Digite o nome da operação matematica média/soma/desvio padrão/mínimo/máximo/mediana:   '))
if escolha == 'média':
    x = str(input('Digite o nome da coluna: '))
    y = str(input('Frequência Y - anual; M - mensal; W - semanal; D - diaria; '))
    operacao = df3[x].resample(y).mean()

elif escolha == 'soma':
    x = str(input('Digite o nome da coluna: '))
    y = str(input('Frequência Y - anual; M - mensal; W - semanal; D - diaria; '))
    operacao = df3[x].resample(y).sum()

elif escolha == 'desvio padrão':
    x = str(input('Digite o nome da coluna: '))
    y = str(input('Frequência Y - anual; M - mensal; W - semanal; D - diaria; '))
    operacao = df[x].resample(y).std()
```

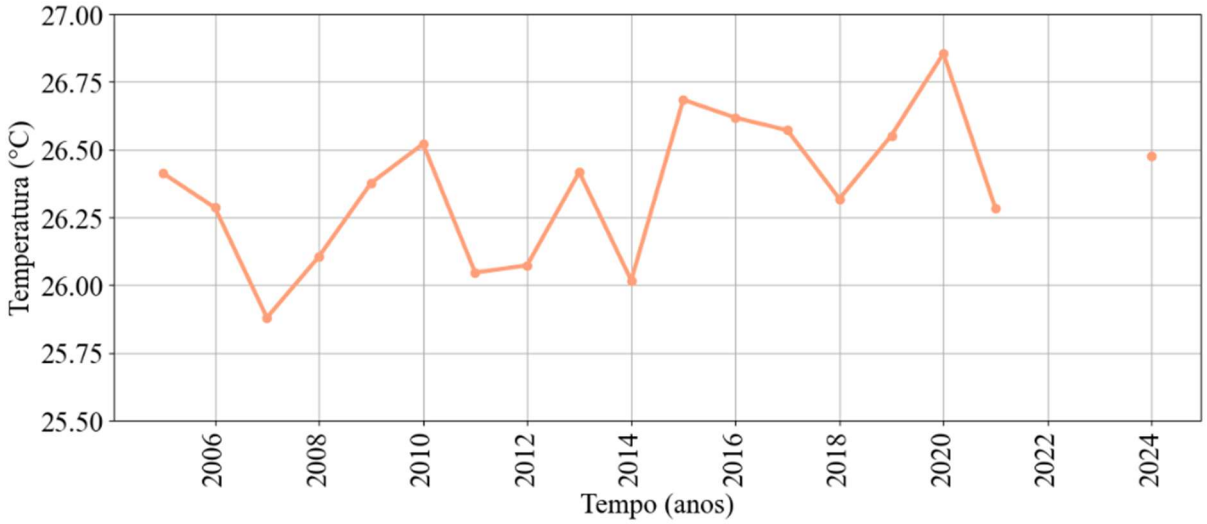
Fonte: Autora (2025).

4.3 Análise dos dados externos

Utilizando o algoritmo desenvolvido, foi realizada uma análise estatística dos dados de temperatura, radiação solar, umidade relativa do ar e precipitação na cidade do Recife. Além disso, foram geradas representações gráficas para facilitar a visualização e a interpretação dos resultados obtidos.

A estatística descritiva dos dados apresentados na Figura 10 indica que a temperatura média anual em Recife foi de 26,36 °C, com um desvio padrão de 0,26 °C, evidenciando uma variação relativamente baixa ao longo do período analisado. A temperatura mínima registrada foi de 25,88 °C, enquanto a máxima atingiu 26,85 °C, o que demonstra a baixa amplitude térmica característica do clima tropical úmido da região. Essa constância térmica é típica de áreas costeiras próximas à linha do Equador, onde a influência marítima atua como moderadora da temperatura (Nimer, 1989).

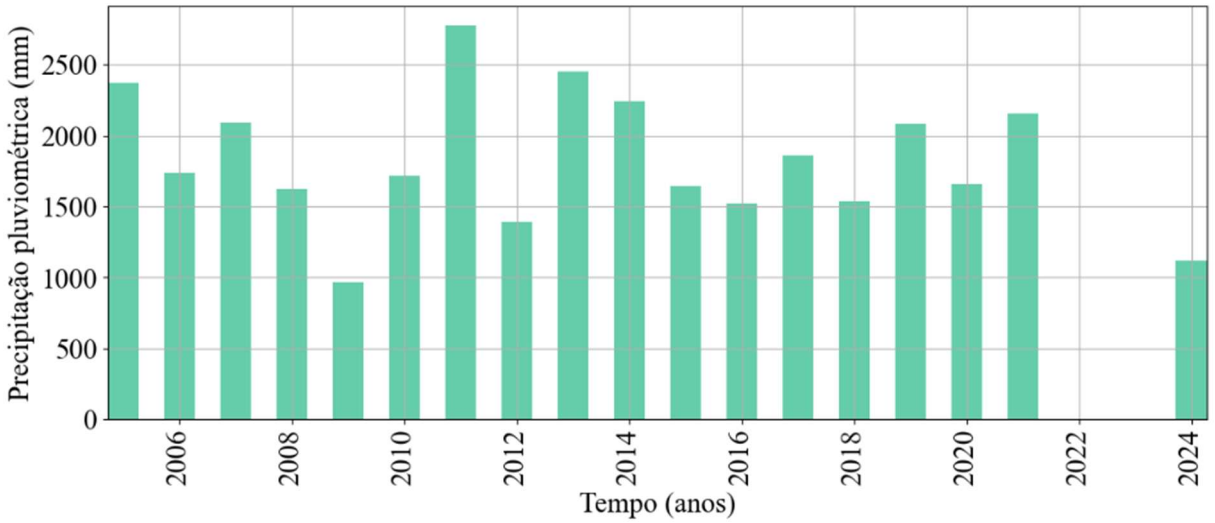
Figura 10 - Temperatura média de Recife entre 2005 e 2024



Fonte: Autora (2025).

Complementando essa análise térmica, os dados de precipitação anual, ilustrados na Figura 11, apontam para uma significativa variabilidade nos índices pluviométricos. O valor máximo registrado foi de 2775,20 mm, evidenciando a ocorrência de períodos de chuvas intensas, enquanto os menores volumes se aproximaram dos 1500 mm. Tal padrão é coerente com a sazonalidade marcante das chuvas em regiões tropicais úmidas, frequentemente influenciadas por sistemas meteorológicos como a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e os Distúrbios Ondulatórios de Leste (Ferreira; Mello, 2005).

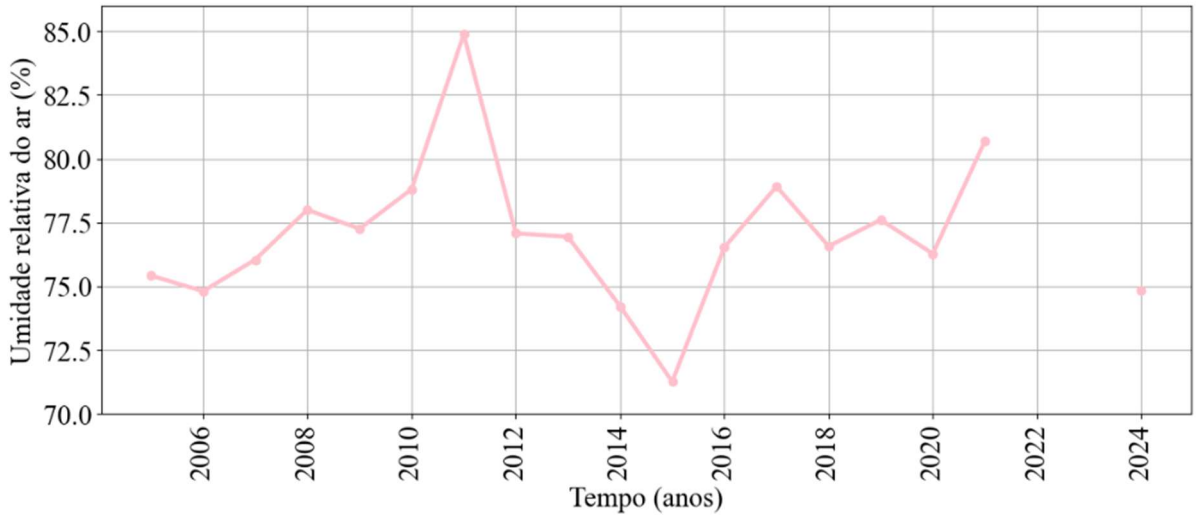
Figura 11 - Precipitação pluviométrica em Recife entre 2005 e 2024



Fonte: Autora (2025).

No que se refere à umidade relativa do ar, conforme mostra a Figura 12, observa-se que os valores se mantêm elevados ao longo dos anos, com mínima de 71,26% e máxima de 84,87%, e uma média de 77,01%. O desvio padrão de apenas 2,86% reforça a estabilidade desse parâmetro na atmosfera local. Esses índices elevados de umidade, além de serem comuns em áreas tropicais litorâneas, contribuem para a sensação térmica constante e para a formação frequente de nebulosidade (Alvares *et al*., 2013).

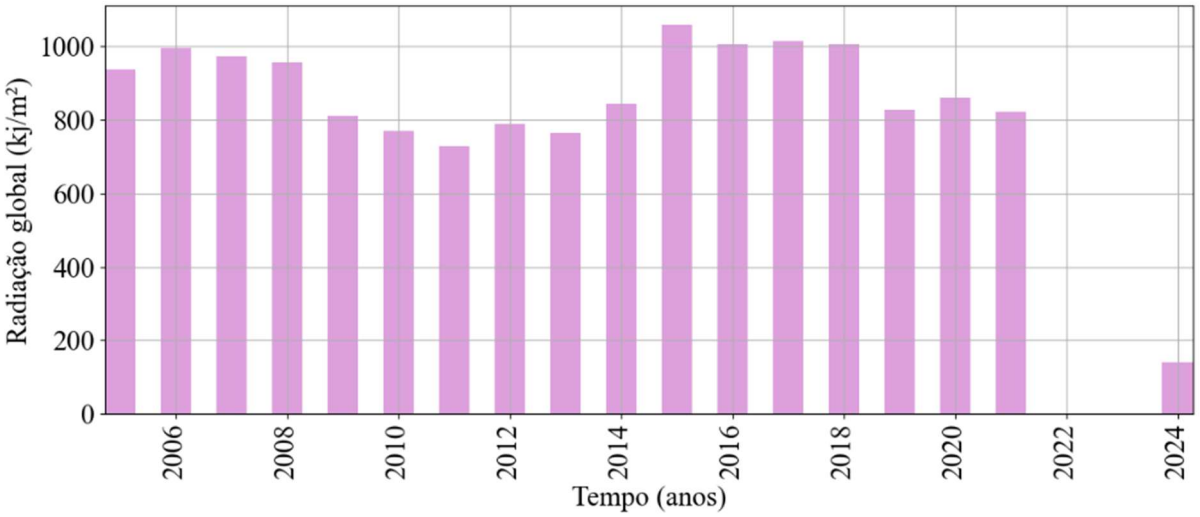
Figura 12 - Umidade relativa média em Recife entre 2005 e 2024



Fonte: Autora (2025).

Por fim, a análise da radiação solar, representada na Figura 13, revela uma média anual de 849,53 KJ/m², com variação considerável ao longo do período, refletida pelo desvio padrão de 204,81 KJ/m². A amplitude entre os valores mínimos (139,78 KJ/m²) e máximos (1056,89 KJ/m²) pode ser atribuída à variação na cobertura de nuvens e à influência das estações chuvosa e seca. Essa variação na radiação global é um fator importante na dinâmica energética da cidade e deve ser considerada em estratégias de conforto térmico e eficiência energética, como o uso de telhados verdes (Saito *et al*., 2017).

Figura 13 - Radiação global média em Recife entre 2005 e 2024



Fonte: Autora (2025).

A fim de comparar a evolução do desempenho térmico do telhado verde entre os anos de 2021 (ano de implementação) e 2024, foram selecionados dois dias de análise no mês de abril de cada ano para avaliar a temperatura ambiente interna. Os dias foram selecionados com base nos critérios descritos na Tabela 2.

Tabela 3 - Datas selecionadas para análise detalhada da temperatura nos telhados

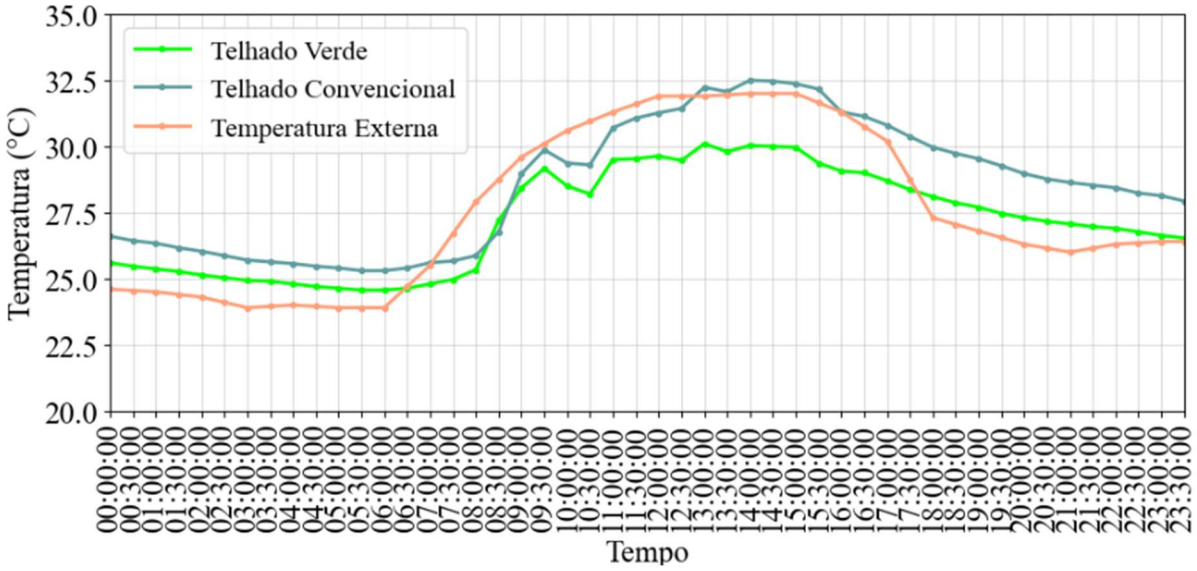
Dia	Critério de escolha
21/04/2021	Dia de alta amplitude térmica (8,1°C)
22/04/2021	Dia de maior temperatura (32,3 °C)
21/04/2024	Dia de alta amplitude térmica (7,7ºC)
22/04/2024	Dia de maior temperatura (31,8 °C)

Fonte: Autora (2025).

4.4 Análise dos dados internos do telhado verde

Conforme ilustrado na Figura 14, no dia 21 de abril de 2021, às 13 horas — o horário mais quente do dia —, o telhado verde registrou uma temperatura interna máxima de 30,1°C, inferior tanto à temperatura externa do ambiente (31,9°C) quanto à do telhado convencional (32,3°C). Além disso, observou-se que o telhado verde apresentou temperaturas mais elevadas nas horas mais frias do dia e temperaturas mais amenas nas horas mais quentes. Esse comportamento está de acordo com o estudo de Kono (2019), que demonstrou a capacidade dos telhados verdes de reter calor durante a noite, proporcionando temperaturas mais confortáveis nas horas mais frias do dia.

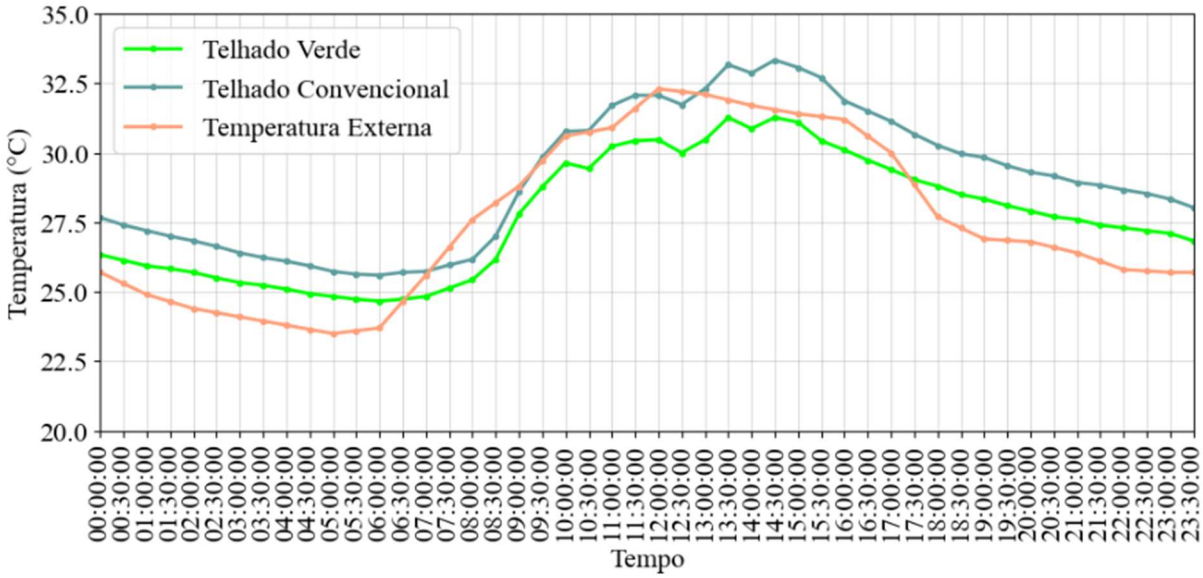
Figura 14 - Temperatura interna e externa ao longo do dia 21 de abril de 2021



Fonte: Autora (2025).

O gráfico apresentado na Figura 15 ilustra a variação da temperatura ao longo do dia 21 de abril de 2024. A análise dos dados do mesmo telhado verde três anos depois revela que o telhado convencional permanece apresentando os maiores picos de temperatura interna, ultrapassando os 33 °C por volta das 13h30. Já o telhado verde manteve-se consideravelmente mais estável, com temperaturas internas mais amenas, variando entre 25 °C e 31 °C ao longo do dia. Durante a madrugada e início da manhã, tanto o telhado verde quanto o convencional apresentaram temperaturas superiores à externa, mas com uma diferença notável entre os dois sistemas: o telhado verde iniciou o dia com cerca de 1,5 °C a menos do que o telhado convencional.

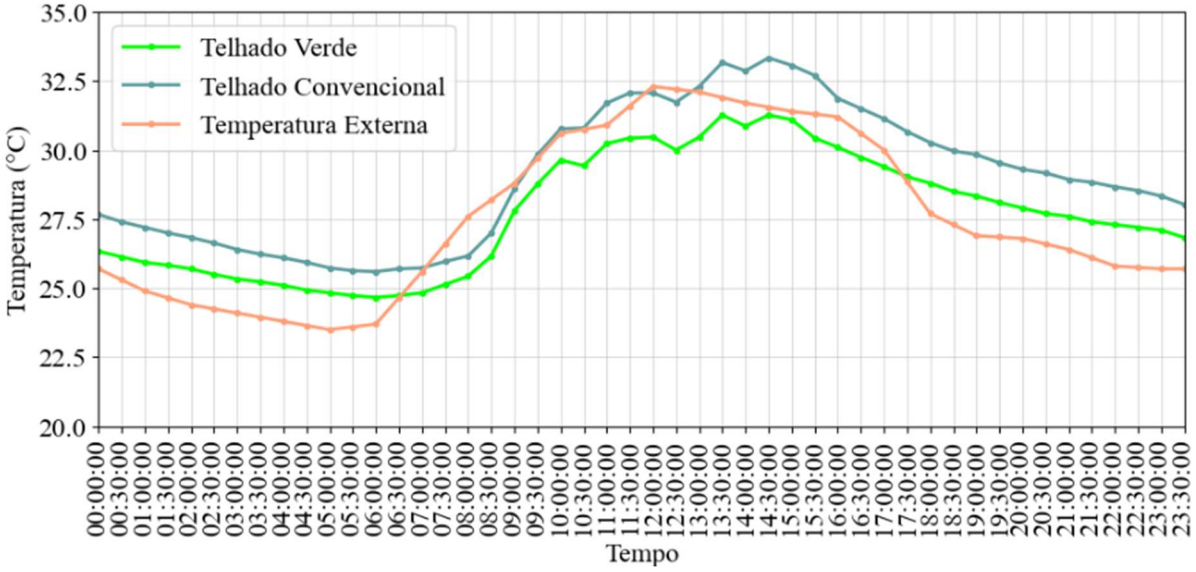
Figura 15 - Temperatura interna e externa ao longo do dia 21 de abril de 2024



Fonte: Autora (2025).

No dia 16 de abril de 2021, o telhado verde atingiu uma temperatura interna máxima de 31,26°C, permanecendo abaixo tanto da temperatura externa, que foi de 32,2°C, quanto da registrada no telhado de referência, de 33,33°C, conforme mostrado na Figura 14. Observou-se, ainda, um comportamento semelhante ao do dia 21 de abril de 2021, em que o telhado verde apresentou temperaturas mais altas durante as horas mais frias do dia e mais amenas nos períodos mais quentes.

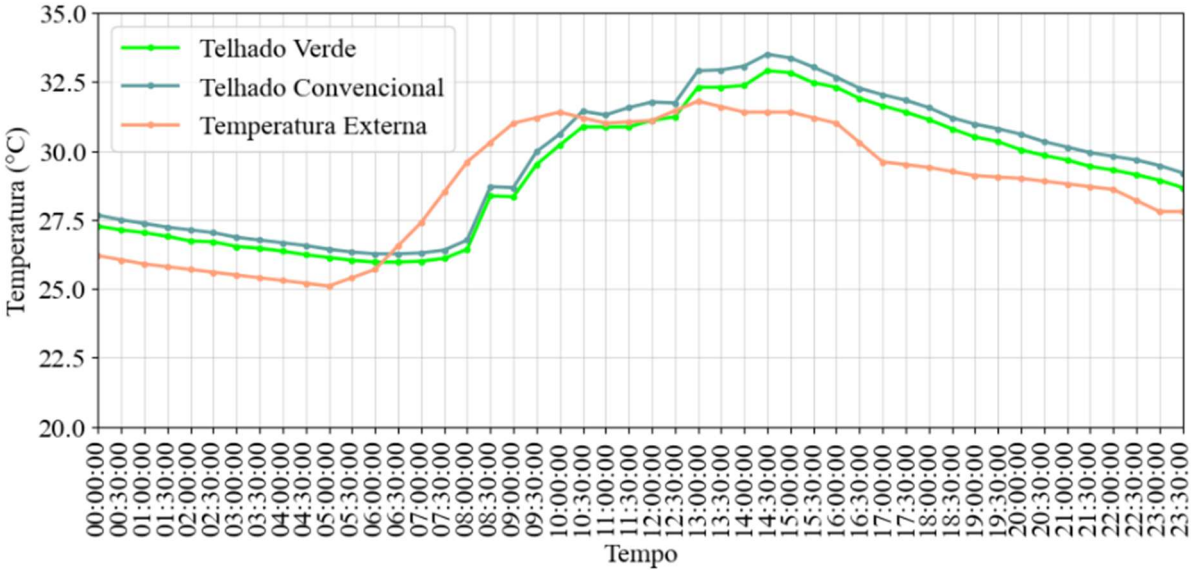
Figura 16 - Temperatura interna e externa ao longo do dia 22 de abril de 2021



Fonte: Autora (2025).

A partir dos dados apresentados na Figura 17 nota-se que o telhado verde, apesar de continuar proporcionando temperaturas mais confortáveis entre 0h e 6h e de manter-se mais fresco do que a temperatura externa e o telhado convencional durante os horários mais quentes, registrou, às 13 horas, uma temperatura interna de 32,3°C, muito próxima dos 32,9°C observados no telhado convencional de laje. Além disso, ambas as temperaturas estavam acima da temperatura externa no mesmo horário, que foi de 31,8°C. Esse comportamento encontra respaldo em um estudo conduzido por Vieira *et al.* (2016), que compararam a variação de temperatura interna entre ambientes com cobertura verde e com telhado convencional de fibrocimento. Os autores observaram que, embora o telhado verde apresente uma menor amplitude térmica ao longo do dia, nos momentos de pico de radiação solar, as temperaturas internas dos dois sistemas tendem a se aproximar. Isso indica que, apesar da reconhecida capacidade dos telhados verdes em mitigar variações térmicas, sua eficiência pode ser impactada por fatores como a capacidade térmica do substrato, a densidade da vegetação e as condições climáticas específicas do local.

Figura 17 - Temperatura interna e externa ao longo do dia 22 de abril de 2024



Fonte: Autora (2025).

Esses resultados indicam que o desempenho térmico dos telhados verdes pode variar ao longo do tempo, especialmente em função de fatores como o clima local, o tipo de vegetação e as características do substrato. Estudos como o de Dias (2016) demonstram que, embora as coberturas verdes contribuam significativamente para a melhoria do conforto térmico em diferentes condições climáticas, sua eficácia está condicionada a aspectos como manutenção adequada e adaptação ao ambiente específico. Nesse sentido, Schmidt (2020) destaca a

importância da composição do substrato, apontando que materiais com maior capacidade de retenção hídrica e isolamento térmico proporcionam um desempenho mais duradouro. Assim, a escolha criteriosa dos componentes do sistema, aliada a práticas regulares de manutenção e ao uso de espécies vegetais adaptadas ao clima local, pode garantir a eficácia contínua dos telhados verdes ao longo do tempo.

5 CONCLUSÃO

O presente estudo avaliou o desempenho térmico e hidrológico dos telhados verdes como estratégia para mitigar as ilhas de calor urbanas em Recife, analisando dados meteorológicos, sensoriamento remoto e experimentos práticos na Unidade Experimental de Telhado Ecológico (UETER). Os resultados demonstraram que os telhados verdes apresentam vantagens significativas em comparação às coberturas convencionais, especialmente no controle térmico.

A identificação de ilhas de calor por meio de sensoriamento remoto evidenciou a relação entre a expansão urbana, a redução da vegetação e o aumento da temperatura superficial em Recife. Nesse contexto, os telhados verdes emergem como uma solução multifuncional, alinhada às políticas públicas locais, como a Lei nº 18.112/2015, e aos critérios da NBR 15575-1.

A análise térmica revelou que, embora os telhados verdes mantenham temperaturas internas mais estáveis — mais amenas nos períodos quentes e mais elevadas nas horas frias —, seu desempenho diminuiu após três anos, sugerindo a necessidade de manutenção periódica e otimização do substrato.

Em síntese, a pesquisa reforçou a viabilidade dos telhados verdes como tecnologia sustentável para o planejamento urbano, combinando benefícios ambientais, econômicos e sociais. Recomenda-se, contudo, estudos futuros sobre a durabilidade do sistema, técnicas de manutenção e adaptações para diferentes climas, a fim de garantir sua eficiência em larga escala. Portanto, a implementação dessas estruturas, associada a outras medidas de infraestrutura verde, pode transformar Recife em uma cidade mais resiliente às mudanças climáticas e mais habitável para sua população

REFERÊNCIAS

ABNT (2013). “NBR 15575: Edificações habitacionais – Desempenho”. Rio de Janeiro.

ALMEIDA, M. G. D. Análise de procedimentos de manutenção e manifestações patológicas em telhados verdes. Belo Horizonte, 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. *Köppen’s climate classification map for Brazil*. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013. DOI: https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507.

ALVES, J. J. A.; BEZERRA, C. W. F.; SILVA FILHO, R. V.; SOUZA, J. V. S.; CORDEIRO, J. A.; SILVA, L. F. *Telhado verde e seu desempenho térmico em residências de regiões semiáridas*. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, v. 14, n. 4, p. 1-10, 2021.

RECIFE (Pernambuco). Lei nº 18.112, de 6 de julho de 2015. Dispõe sobre a melhoria da qualidade ambiental das edificações por meio da obrigatoriedade de instalação do "telhado verde", e construção de reservatórios de acúmulo ou de retardo do escoamento das águas pluviais para a rede de drenagem e dá outras providências. *Recife*, 2015.

CAMPBELL, James B.; WYNNE, Randolph H. *Introduction to Remote Sensing*. 5. ed. New York: Guilford Press, 2011.

CARTER, T.; BUTLER, C. *Ecological impacts of replacing traditional roofs with green roofs in two urban areas*. *Cities and the Environment*, v. 1, n. 2, 2008.

CASAGRANDE, T.; TAVARES, S. F.; NOYA, M. G. *Impacto de telhados verdes intensivos no desempenho térmico e hidrológico*. *PARC: Pesquisa em Arquitetura e Construção*, Campinas, v. 14, 2023.

CHAGAS, B. B.; CALHEIROS, H. C. *Projeto e construção de telhados verdes fotovoltaicos na promoção da sustentabilidade hídrica e energética*. *Contribuciones a las Ciencias Sociales*, [S. l.], v. 16, n. 7, p. 8206–8220, 2023. DOI: 10.55905/revconv.16n.7-238. Disponível em:

https://ojs.revistacontribuciones.com/ojs/index.php/clcs/article/view/1409. Acesso em: 22 ago. 2024.

CIRQUEIRA, N. V. M.; LIMA, L. E. A.; OLIVEIRA, R. A. P. *O uso do telhado verde como uma alternativa sustentável aos centros urbanos: uma revisão*. *Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro*, [S. l.], v. 4, n. 1, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.61164/rmnm.v4i1.2297. Acesso em: 14 abr. 2025.

COSTA, D. F.; SILVA, H. R.; PERES, L. F. *Identificação de ilhas de calor na área urbana de Ilha Solteira - SP através da utilização de geotecnologias*. *Engenharia Agrícola*, v. 30, n. 5, p. 974-985, 2010. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0100-69162010000500019. Acesso em: 14 abr. 2025.

COSTA, E. C. P.; CARDÃO, R.; SEABRA, V. S. *Análise da eficiência dos índices Built-up e NDBI para classificação de áreas urbanas em imagens Landsat 8 OLI*. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO (SBSR), 18., 2017, Santos.

COSTA, D. F.; SILVA, H. R.; PERES, L. de F. *Identificação de ilhas de calor na área urbana de Ilha Solteira - SP utilizando dados do sensor TM Landsat-5*. *Engenharia Agrícola*, v. 30, n. 5, p. 974-985, 2010.

DIAS, A. E. *O desempenho térmico de uma cobertura verde em simulações computacionais*. 2016. 192 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

ENGESAT. *Landsat 8 – Imagem de Satélite*. Curitiba-PR, 2013. Disponível em: https://www.engesat.com.br/imagem-de-satelite/landsat-8/. Acesso em: 15 mar. 2025.

FERRAZ, I. L. *O desempenho térmico de um sistema de cobertura verde em comparação ao sistema tradicional de cobertura com telha cerâmica*. São Paulo, 2012. 150 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil.

FERREIRA, A. G.; MELLO, N. A. S. *A Zona de Convergência Intertropical e sua influência sobre a região nordeste do Brasil*. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 1, p. 29–45, 2005. Disponível em: https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/4169. Acesso em: 5 abr. 2025.

FRIZON, A. J.; LÁZARO, P. H. B.; KEMPTER, E. D.; CANTERAS, F. B. *Telhados verdes como alternativa para construções sustentáveis*. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, v. 13, n. 5, p. 620-629, 2018.

GARTLAND, L. *Ilhas de calor: como mitigar zonas de calor em áreas urbanas*. São Paulo: Oficina de Texto, 2010. 28 p. Disponível em: https://ofitexto.arquivos.s3.amazonaws.com/Degustacao-Ilhas-de-Calor.pdf.

GIACOMELLO, E.; GASPARI, J. *Hydrologic performance of an extensive green roof under intense rain events: results from a rain-chamber simulation*. *Sustainability*, v. 13, n. 6, p. 3078, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.3390/su13063078.

HE, C.; XIE, C. *Improving the normalized difference built-up index to map urban built-up areas using a semiautomatic segmentation approach*. *Remote Sensing Letters*, v. 1, n. 4, p. 213-221, dez. 2010.

HENEINE, M. C. A. S. **Cobertura Verde.** 2008. 49 f. Monografia (Especialização em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

JENSEN, J. R. *Remote sensing of the environment: an earth resource perspective*. 2. ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2006.

KONO, M. K. N. *Avaliação de conforto térmico de um telhado verde localizado na cidade de Londrina – PR*. 2019. 81 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2019.

LEONARDO, H. R. A. L. *Desempenho de telhados ecológicos em área urbana*. 2021. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2021.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. *Remote sensing and image interpretation*. 4. ed. New York: John Wiley & Sons, 1999.

LI, X.; ZHOU, Y.; ASRAR, G. R.; ZHU, Z. *Creating a seamless 1 km resolution daily land surface temperature dataset for urban and surrounding areas in the conterminous United States*. *Remote Sensing of Environment*, v. 206, p. 84–97, 2018.

LIU, H. Q.; HUETE, A. A. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmosphere noise. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 33, n. 2, p. 457-465, mar. 1995.

MCKINNEY, W. *Python for Data Analysis*. O'Reilly Media, Inc., 2017.

MITCHELL, R. *Web Scraping with Python: Collecting Data from the Modern Web*. O'Reilly Media, 2018.

NEVES, L. O. *Estudo de desempenho térmico entre cobertura com telhado verde e cobertura com telha de fibrocimento a base de Arduino*. Publicação VII 2023/2 Curso de Engenharia Civil, Faculdade Evangélica de Goianésia - FACEG, Goianésia, GO, 14 p., 2023.

NIMER, E. *Climatologia do Brasil*. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 1989.

NÓBREGA, R. S.; VITAL, L. A. B. *Influência da Urbanização sobre o Microclima de Recife e Formação de Ilha de Calor*. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 3, p. 151-156, 2010.

OHNUMA JÚNIOR, A. A. *Medidas não convencionais de reservação d'água e controle da poluição hídrica em lotes domiciliares*. Tese de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental, Universidade de São Paulo, São Carlos, 331 f., 2008.

OKE, T. R. *The energetic basis of the urban heat island*. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 108, n. 455, p. 1-24, 1982.

OLIVEIRA, D.; RODRIGUES, D.; OLIVEIRA JR., C. J. F. *Telhados verdes: uma proposta para o uso de espécies nativas do Brasil*. *Revista Mix Sustentável*, v. 7, n. 3, p. 111–126, 2021.

OLIVEIRA, S. H. R. *Telhado verde: uma possibilidade sustentável*. 2019. 64 p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2019.

OLIVEIRA, E. W. N. *Telhados verdes para habitações de interesse social: retenção das águas pluviais e conforto térmico*. 2009.

RICHARDS, J. A. *Remote Sensing Digital Image Analysis*. 5. ed. Berlin: Springer-Verlag, 2013.

ROCHA, R. S. T. M. *Desempenho Térmico de Telhado Verde Ecológico de Baixo Custo em Clima Semiárido*. 2020. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2020.

RODRIGUES, B. V.; CABRAL, R. P. S. *Telhado Verde: Análise Comparativa entre Telhado Verde e Telhado Convencional*. 2020. 47 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade Evangélica de Goianésia, 2020.

SAITO, S. M. T.; GOMES, V. A.; MATOS, R. A. A.; CABRAL, R. O. Green Roofs and their Contribution to Urban Sustainability: Thermal Performance and Environmental Benefits. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 17, n. 2, p. 239–254, abr./jun. 2017. DOI: https://doi.org/10.1590/s1678-86212017000200184.

SANTOS, L. C. *Análise do Custo Benefício da Implantação do Sistema Construtivo de Telhado Verde em uma Edificação no Município de Barra do Garças-MT*. 2018. 93 f. TCC (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Mato Grosso, Campus Universitário do Araguaia, Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Barra do Garças, 2018.

SAKUNO, N. R. R.; KAWAKUBO, F. S.; SPALEVIC, V.; MINCATO, R. L. Mapeamento de Superfícies Impermeáveis em Áreas Urbanas Utilizando Imagens Índices Geradas Pelo Sistema Landsat-5 Thematic Mapper. *Revista do Departamento de Geografia*, São Paulo, Brasil, n. spe, p. 190–198, 2017.

SILVA, R. F.; OLIVEIRA, P. P. Eficiência de telhados verdes nos centros urbanos: uma abordagem analítica. *Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro*, [S. l.], v. 6, n. 1, 2024. DOI: 10.61164/rmnm.v6i1.2516.

SILVA, R. Telhado verde e sua influência micrometeorológica. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Engenharia Agrícola, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Recife, 2019.

SILVA, F. C. M.; SIQUEIRA, J. P.; ARAGÃO, S. F. Telhados verdes e seus benefícios à sociedade e ao meio ambiente. *Repositório UniToledo*, 20 p., 2016.

SILVA, V. J. Modelagem de biorretenção com uso de modelo concentrado. 2018. 116 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2018.

SCHMIDT, M. Influência da composição do substrato no desempenho térmico de telhados verdes. 2020. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, Universidade Estadual do Oeste do Paraná. 57 p.

SOUSA, Í. V. D.; SOUSA, H. V. D.; MAGALHÃES JUNIOR, A. M.; NUNES, P. H.; FARIA, I. L. C.; FARIA, A. J. C. Os benefícios do telhado verde e a sua utilização pela construção civil. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, v. 13, n. 2, p. 170-181, jun. 2021.

SOUZA, F. M. B. de; MENESES, L. L.; CARVALHO, N. B. Telhado verde: uma proposta de implementação na Universidade Tiradentes. *Ciências Exatas e Tecnológicas*, Aracaju, v. 6, n. 2, p. 77-87, set. 2020.

TASSI, R.; TASSINARI, L. C. S.; PICCILLI, D. G. A.; PERSCH, C. G. Telhado verde: uma alternativa sustentável para a gestão das águas pluviais. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v.

14, n. 1, p. 139-154, mar. 2014. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S1678-86212014000100012.

TEIXEIRA, N. N.; ARAÚJO, A. V. S. Gestão municipal de drenagem e manejo de águas pluviais: avaliação dos impactos decorrentes da urbanização na Cidade Nova, Ilhéus-BA. *Revista de Gestão e Secretariado*, [S. l.], v. 14, n. 6, p. 9968-9997, 2023. DOI: 10.7769/gesec.v14i6.2351.

TEIXEIRA, C. A. Estudo comparativo da qualidade da água da chuva coletada em telhado com telhas de concreto e em telhado verde para usos não potáveis. *Ambiente Construído*, v. 17, n. 12, p. 135-155, 2017.

TUCCI, C. Gerenciamento da drenagem urbana. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 7, n. 1, p. 5-27, 2002.

VAN ROSSUM, G.; DRAKE, F. L. *Python 3 Reference Manual*. CreateSpace, 2009.

VIEIRA, T. J.; FLEISCHFRESSER, L.; PRUDENTE, L. A. Comparação da variação de temperatura interna de um ambiente revestido com telhado verde e um com telhado convencional. In: *Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Ambiental*, 14.; *Fórum Latino Americano de Engenharia e Sustentabilidade*, 2.; *Simpósio Brasileiro de Engenharia Ambiental - Centro-Oeste*, 1., 2016, Brasília. Anais eletrônicos... Brasília, 2016.

VILARIM, M. B. Desempenho térmico de telhado verde de baixo custo em região de clima tropical úmido. 2022. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2022.

WU, A. N.; BILJECKI, F.. Roofpedia: Automatic mapping of green and solar roofs for an open roofscape registry and evaluation of urban sustainability. *Landscape and Urban Planning*, v. 214, p. 104167, 2021.

ZHA, Y.; GAO, J.; NI, S. Use of Normalized Difference Built-Up Index in Automatically Mapping Urban Areas from TM Imagery. *International Journal of Remote Sensing*, v. 24, n. 3, p. 583-594, 2003.