

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
RONDÔNIA – (IFRO) CAMPUS PORTO VELHO CALAMA
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

ANTONIO VINICIUS SALLES SILVA

**DINÂMICAS CLIMÁTICAS URBANAS EM PORTO VELHO: UMA ABORDAGEM
INTEGRADA ENTRE ZONAS CLIMÁTICAS LOCAIS E ÍNDICES ESPECTRAIS**

**PORTO VELHO – RO
2025**

ANTONIO VINICIUS SALLES SILVA

**DINÂMICAS CLIMÁTICAS URBANAS EM PORTO VELHO: UMA ABORDAGEM
INTEGRADA ENTRE ZONAS CLIMÁTICAS LOCAIS E ÍNDICES ESPECTRAIS**

Monografia entregue como Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia (IFRO), Campus Porto Velho Calama, como requisito parcial para obtenção do grau de bacharel, junto ao Curso Engenharia Civil, sob a orientação do professor Dr. Reginaldo Martins Silva de Souza.

**PORTO VELHO - RO
2025**

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Gerador de Ficha Catalográfica do IFRO.

Silva, Antonio Vinicius Salles.

Dinâmicas climáticas urbanas em Porto Velho: uma abordagem integrada entre zonas climáticas locais e índices espectrais / Antonio Vinicius Salles Silva. - Porto Velho, 2025.

62 f. : il.

Orientador(a): Prof. Dr. Reginaldo Martins da Silva de Souza.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia - IFRO, Porto Velho, 2025.

1. Zonas Climáticas Locais. 2. Urbanização. 3. Índices Espectrais. I. Souza, Reginaldo Martins da Silva de (orient.). II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia - IFRO. III. Título.

Bibliotecário(a) Responsável: Miria Santana Veiga, CRB-11/898

ANTONIO VINICIUS SALLES SILVA

**DINÂMICAS CLIMÁTICAS URBANAS EM PORTO VELHO: UMA ABORDAGEM
INTEGRADA ENTRE ZONAS CLIMÁTICAS LOCAIS E ÍNDICES ESPECTRAIS**

Monografia entregue como Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia (IFRO), Campus Porto Velho Calama, como requisito parcial para obtenção do grau de bacharel, junto ao Curso Engenharia Civil, sob a orientação do professor Dr. Reginaldo Martins Silva de Souza.

Aprovado em: 08/12/2025 pela banca examinadora.

Prof. Me. Fredi Rodrigues Ramos da Silva

Prof. M.a. Paola Mundim de Souza

Prof. Dr. Reginaldo Martins da Silva de Souza (Orientador)

À MARGARIDA SALLES DA SILVA

“Se a educação sozinha não transforma a sociedade, sem ela tampouco a sociedade muda”

(Paulo Freire)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, à minha mãe, Margarida Salles da Silva, professora e bibliotecária, hoje eternizada em nossas memórias. Foi ela quem, desde os meus primeiros passos, mostrou-me que o caminho do conhecimento é não apenas o mais belo, mas também o mais libertador. Foi ela quem semeou em mim o amor pelo conhecimento e a certeza de que o estudo é uma forma de eternidade.

Ao meu pai e aos meus irmãos, cujo apoio constante sustentou cada etapa desta caminhada. Seus esforços foram a base que me permitiu chegar até aqui com firmeza e gratidão.

Aos amigos e à minha namorada, presentes nos dias difíceis, que me ofereceram incentivo, paciência e acolhimento quando o cansaço parecia maior do que a vontade. Sem vocês, este percurso teria sido mais árduo e menos bonito.

E, por fim, aos meus professores orientadores, que me acompanharam com rigor, generosidade e cuidado ao longo destes meses.

RESUMO

Este estudo investigou a influência do processo de urbanização na formação e configuração das Zonas Climáticas Locais (ZCLs) de Porto Velho (RO), integrando a classificação morfológica urbana a métricas espectrais derivadas de imagens Landsat 8 (NDVI, NDWI, NDBI e BUI). O mapeamento das ZCLs foi realizado por meio do LCZ Generator, complementado por vetorização e refinamentos no QGIS. Em seguida, os índices espectrais foram calculados, reclassificados e integrados espacialmente às ZCLs, permitindo caracterizar de forma quantitativa como a expansão urbana, o adensamento construtivo e a substituição da vegetação estruturam o clima urbano da capital. Os resultados demonstram que a urbanização recente favoreceu a consolidação de ZCLs compactas, ZCL 2 e ZCL 3, que compõem 29,94% do território mapeado e apresentam NDVI < 0,20, NDWI seco em mais de 95%, NDBI elevado e BUI positivo, evidenciando alta impermeabilização e maior propensão à formação de ilhas de calor. Em oposição, as ZCLs naturais A e D, 21,40%, exibiram NDVI > 0,60, NDWI seco em menos de 90%, NDBI negativo e BUI negativo, refletindo a manutenção de superfícies permeáveis e maior capacidade de moderação térmica. A ZCL 6, 38%, ocupa posição intermediária no gradiente de urbanização, com NDVI entre 0,30–0,50, NDWI seco em 70,05% e BUI próximo de zero, caracterizando áreas em transição entre ambientes vegetados e setores em expansão urbana. Portanto, a integração entre ZCLs e índices espectrais evidenciou que a distribuição das zonas climáticas não é aleatória, mas responde diretamente ao avanço da urbanização e às alterações estruturais do solo urbano.

Palavras-chave: Zonas Climáticas Locais. Urbanização. Índices Espectrais.

ABSTRACT

This study examined how urbanization influences the formation and spatial configuration of Local Climate Zones (LCZs) in Porto Velho (RO) by integrating LCZ morphological classification with spectral metrics derived from Landsat 8 imagery (NDVI, NDWI, NDBI, and BUI). LCZ mapping was produced using the LCZ Generator and refined in QGIS. Spectral indices were subsequently calculated, reclassified, and spatially integrated with the LCZs to quantitatively assess how urban expansion, built-up densification, and vegetation loss shape the city's urban climate. Results show that recent urban growth intensified compact built LCZs (LCZ 2 and LCZ 3), which cover 29.94% of the mapped area and exhibit $NDVI < 0.20$, $NDWI_{dry} > 95\%$, high NDBI, and positive BUI, indicating strong imperviousness and higher susceptibility to heat-island formation. In contrast, natural LCZs A and D (21.40%) present $NDVI > 0.60$, $NDWI_{dry} < 90\%$, negative NDBI, and negative BUI, reflecting permeable surfaces and increased thermal regulation capacity. LCZ 6 (38%) represents an intermediate condition, with NDVI of 0.30–0.50, $NDWI_{dry}$ at 70.05%, and BUI near zero, characterizing transition zones between vegetated areas and expanding urban sectors. Overall, the integration of LCZ mapping and spectral indices demonstrates that the spatial distribution of LCZs is not random but directly shaped by urbanization processes and structural alterations of the urban surface.

Palavras-chave: Local Climate Zones. Urbanization. Spectral Indices.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação das ZCLs com base nos tipos construtivos.....	15
Figura 2 – Classificação das ZCLs com base nos tipos de coberturas de solo.....	15
Figura 3 - Fluxograma da metodologia adotada.....	18
Figura 4 - Mapa de localização da cidade de Porto Velho.....	19
Figura 5 - Mapa de distribuição das ZCLs em Porto Velho.....	25
Figura 6 - Mapa de distribuição das classes de NDVI em Porto Velho.....	28
Figura 7 - Mapa de distribuição das classes de NDVI em Porto Velho.....	31
Figura 8 - Mapa de distribuição das classes de NDBI em Porto Velho.....	34
Figura 9 - Mapa de distribuição das classes de BUI em Porto Velho.....	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classes de NDVI.....	22
Tabela 2 - Classes de NDWI.....	22
Tabela 3 - Classes de NDBI.....	22
Tabela 4 - Classes de BUI.....	22
Tabela 5 - Distribuição das classes de ZCL em Porto Velho.....	25
Tabela 6 - Distribuição das classes de NDVI em Porto Velho.....	28
Tabela 7 - Distribuição das classes de NDWI nas ZCLs em Porto Velho.....	31
Tabela 8 - Distribuição das classes de NDBI nas ZCLs em Porto Velho.....	34
Tabela 9 - Distribuição das classes de BUI nas ZCLs em Porto Velho.....	37

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	3
1.1 OBJETIVOS	4
1.1.1 Objetivo geral	4
1.1.2 Objetivos específicos.....	4
2. JUSTIFICATIVA	5
3. REFERENCIAL TEÓRICO	7
3.1 CLIMA.....	7
3.1.2 Elementos climáticos.....	8
3.1.3 Clima Urbano	9
3.1.4 Fatores do Clima Urbano	10
3.1.5 Ilhas de Calor	11
3.2 GEOTECNOLOGIAS APLICADAS AO ESTUDO DO CLIMA.....	12
3.2.1 Sensoriamento remoto.....	12
3.2.2 Sistemas de Informação Geográfica (SIG).....	13
3.2.3 Zonas Climáticas Locais (ZCL)	13
3.2.4 Índices Espectrais	16
4. METODOLOGIA.....	18
4.1 ÁREA DE ESTUDO	18
4.2 MAPEAMENTO DAS CLASSES ZCLs	19
4.3 CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL E URBANA VIA ÍNDICES ESPECTRAIS.....	20
4.3.1 Procedimentos para a classificação dos índices	21
4.4 INTEGRAÇÃO DOS ÍNDICES ESPECTRAIS COM AS ZONAS CLIMÁTICAS LOCAIS	23
5. RESULTADOS	24
5.1 DISTRIBUIÇÃO DAS ZONAS CLIMÁTICAS LOCAIS EM PORTO VELHO	24
5.2 DISTRIBUIÇÃO DAS CLASSES DE NDVI EM PORTO VELHO	27
5.2.1 Distribuição das classes de NDVI nas ZCLs	29
5.3 DISTRIBUIÇÃO DAS CLASSES DE NDWI EM PORTO VELHO	30
5.3.1 Distribuição das classes de NDWI nas ZCLs.....	32
5.4 DISTRIBUIÇÃO DAS CLASSES DE NDBI EM PORTO VELHO	33
5.4.1 Distribuição das classes de NDBI nas Zonas Climáticas Locais.	35
5.5 DISTRIBUIÇÃO DAS CLASSES DE BUI EM PORTO VELHO	36
5.5.1 Distribuição das classes de BUI nas Zonas Climáticas Locais.	38
CONCLUSÃO.....	40
REFERÊNCIAS	41

APÊNDICES.....	43
-----------------------	-----------

INTRODUÇÃO

A cidade constitui um fenômeno dinâmico, em que os limites entre as esferas econômica, social e política estão em constante recomposição, marcada por permanente expansão e transformação. Seu desenvolvimento e suas mudanças resultam de um processo impulsionado pelo crescimento demográfico, pelas políticas públicas e pelas atividades econômicas, como o comércio, a indústria e os serviços (Guimarães; Soares Filho, 2007; Corrêa, 2007). De modo geral, as cidades constituem espaços de intersecção entre as verticalidades e horizontalidades. As verticalidades representam os vetores de uma racionalidade centralizada, associada ao discurso pragmático dos grupos hegemônicos, moldando um cotidiano controlado e disciplinado. Já as horizontalidades abrigam tanto finalidades externas, impostas de maneira distante e superior, quanto contra finalidades surgidas localmente. São, assim, o cenário de um cotidiano que pode ser conforme sem necessariamente ser conformista, isto é, um espaço de simultânea passividade e resistência, cegueira e descoberta, acomodação e contestação (Santos, 2002).

A relação estabelecida pelas verticalidade e horizontalidades fundamentou uma tradição do planejamento urbano fundamentado na separação entre cidade e natureza, estabelecendo uma clara distinção entre o "espaço urbanizado" e o "não urbanizado". Enquanto a maioria dos estudos urbanísticos concentra-se nas áreas edificadas, as abordagens voltadas ao planejamento ambiental encontram desafios para integrar a realidade e os impactos gerados pela cidade (Santos, 2004; Polidori, 2004). Essa dicotomia histórica ganha relevância quando analisamos o clima urbano. A esse respeito, Monteiro (1990) afirma que a evolução dos estudos sobre o tema se originou do contraste com as condições do meio rural circundante. O autor, destaca, ainda, a cidade como um espaço de transformação antrópica contínua, cumulativa e acentuada.

A oposição entre verticalidades e horizontalidades tem imprimido um processo de urbanização em que o clima urbano pode ser entendido como o produto das alterações provocadas pelo processo de urbanização na superfície terrestre, bem como da influência dessa urbanização sobre as características atmosféricas de uma região específica (Oke, 1978; Souza, 2010). Dentre os aspectos mais relevantes da influência antrópica no clima das cidades, destaca-se o fenômeno da ilha de calor. Assim, nos estudos de clima urbano, é essencial considerar o uso e a ocupação do solo, aliados à geomorfologia e suas características resultantes. A cidade, portanto, deve ser analisada em conexão com seu entorno, promovendo uma integração entre os contextos urbano e natural. (Ayoade, 1978; Souza, 2010).

Uma das técnicas mais comumente empregada no estudo de ilhas de calor é o uso de imagens de satélite. Para análises de grandes áreas, o sensoriamento remoto se destaca como a ferramenta extremamente apropriada, pois permite ao pesquisador coletar dados sobre os alvos da superfície terrestre com base no registro da interação entre a energia eletromagnética e esses alvos (Castro, 2009; Tejas, 2012). Nesse sentido, Tejas (2012), as anomalias térmicas ou ilhas de calor, inicialmente observadas nos principais centros regionais, têm se expandido para cidades de médio porte. Na Amazônia, a expansão das cidades sem o planejamento e gestão territorial que considere os impactos da urbanização ao clima ganha especial atenção, uma vez que as temperaturas já são naturalmente elevadas ao longo do ano, decorrem de sua proximidade à linha do Equador, onde a incidência solar é mais intensa, distinguindo-a das demais regiões do Brasil.

Assim, o presente trabalho propõe-se a investigar a configuração e as mudanças nas classes das Zonas Climáticas Locais em um dos principais centros urbanos da Amazônia: a cidade de Porto Velho, capital do estado de Rondônia. A ocupação da cidade foi inicialmente impulsionada por surtos migratórios ligados a ciclos econômicos, como a construção da Estrada de Ferro Madeira-Mamoré e a exploração da borracha, ainda no início do século XX. Posteriormente, o crescimento urbano foi intensificado por ciclos econômicos relacionados à extração de cassiterita e ouro. Mais recentemente, a construção e instalação das usinas hidrelétricas de Santo Antônio e Jirau (Tejas, 2012) representaram um fator decisivo no desenvolvimento da cidade, atraindo cerca de 100 mil pessoas e incentivando a verticalização do espaço urbano (Nascimento et al., 2012).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

- Identificar a influência do processo de urbanização na formação das Zonas Climáticas Locais (ZCL).

1.1.2 Objetivos específicos

- Identificar e classificar as ZCLs existentes na cidade de Porto Velho, Rondônia.
- Espacializar os índices radiométricos de NDWI, NDVI, NDBI e Built-up.
- Verificar a influência do processo de urbanização na configuração das ZCLs por meio da análise da distribuição dos índices radiométricos de NDWI, NDVI, NDBI e Built-up.

2. JUSTIFICATIVA

A literatura especializada em clima urbano evidencia de forma consistente que a intensificação das atividades antrópicas ao longo do processo de urbanização, especialmente quando desacompanhada de planejamento territorial adequado, desencadeia desequilíbrios ambientais de grande magnitude (Gomes; Amorim, 2003). Segundo Aleixo (2014), desde a década de 1970 os estudos de clima urbano no Brasil têm apontado alterações térmicas, hídricas e atmosféricas em áreas metropolitanas e em cidades de diferentes portes. O autor destaca que tais mudanças estão diretamente associadas ao uso e ocupação desordenados do solo, nos quais as condições físico-naturais não foram devidamente consideradas no planejamento e na organização dos espaços urbanos. Nessa mesma direção, Gomes e Amorim (2003) e Martelli (2023) demonstram que áreas intensamente urbanizadas, como centros urbanos consolidados, tendem a produzir impactos climáticos mais severos, enquanto regiões com maior arborização e características mais próximas às condições naturais apresentam um clima local mais ameno, marcado por temperaturas reduzidas. Conseqüentemente, os moradores de ambientes altamente urbanizados são mais propensos a experimentar desconforto térmico decorrente da ausência de condições climáticas adequadas ao bem-estar humano.

Sob a perspectiva da saúde pública, o ambiente térmico nas áreas urbanas está intimamente relacionado aos mecanismos de termorregulação e regulação circulatória do corpo humano. Essa relação, em ambientes altamente alterados e momentos extremos, pode gerar sobrecargas no organismo, comprometendo a saúde e, em casos mais graves, levando até a morte (Ribeiro et al., 2016). Ainda sobre a relação entre saúde e clima urbano, Aleixo (2014) explica que doenças respiratórias tendem a se agravar especialmente entre idosos e crianças, devido à menor capacidade de adaptação bioclimática desses grupos. Esse risco é intensificado por fatores como o tipo de material utilizado nas construções, as condições socioeconômicas que limitam o acesso a equipamentos de climatização, além da percepção individual do clima e o tipo de vestimenta adotada. A autora acrescenta, ainda, que eventos extremos de temperatura, ao potencializarem o desconforto térmico, têm sido objeto de estudos em diversos países. Na Europa, por exemplo, ondas de frio e calor têm sido associadas a um aumento expressivo nos casos de morbidade e mortalidade relacionados a doenças cardiovasculares e respiratórias.

Dessa forma, compreender as transformações espaciais e climáticas no ambiente urbano de Porto Velho é fundamental para o desenvolvimento de estratégias de planejamento mais

eficientes e sustentáveis. A análise da influência do processo de urbanização na configuração das Zonas Climáticas Locais (ZCLs) fornece embasamento técnico qualificado para o planejamento urbano e para a construção civil, ao demonstrar como decisões relacionadas ao uso e ocupação do solo, aos materiais construtivos e à infraestrutura urbana influenciam diretamente o clima local e, conseqüentemente, a qualidade de vida da população. Nesse sentido, o presente estudo oferece suporte à tomada de decisão de profissionais ao orientar a seleção de materiais e soluções construtivas que integrem rigor técnico e responsabilidade socioambiental, contribuindo para a construção de cidades mais resilientes e adaptadas às mudanças climáticas.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 CLIMA

O clima é a síntese do tempo em uma região específica, podendo ser definido quantitativamente usando os valores esperados dos elementos e fatores meteorológicos, como temperatura, precipitação, vento, pressão e umidade, em uma localidade durante um determinado mês ou estação (Hartmann, 2016). Dessa forma, o termo clima refere-se ao conjunto das características estatísticas da atmosfera, obtidas por meio de observações sistemáticas em um período de pelo menos 30 anos. O clima não se resume apenas às condições médias do tempo, mas também abrange os desvios em relação a esses valores, a ocorrência de eventos extremos e a frequência com que determinadas condições meteorológicas se repetem em uma região (Ayoade, 2003).

O clima de uma região é determinado pela Circulação Geral da Atmosfera (CGA), que decorre do aquecimento desigual do planeta pela radiação solar, da distribuição assimétrica entre oceanos e continentes e das feições topográficas presentes nos continentes. Essa circulação de ar distribui o calor e a umidade ao redor do planeta, formando padrões de vento e pressão que influenciam o clima das diferentes regiões. Impulsionada pelo aquecimento solar desigual e pela rotação da Terra, a CGA mantém o equilíbrio térmico global, gerando regiões de altas e baixas pressões, além de favorecer a formação de nuvens, chuva e a variabilidade climática nas diferentes latitudes (Reboita et al., 2012).

O sistema climático é uma combinação complexa formada principalmente pela atmosfera, pelos oceanos e pela superfície terrestre, que interagem através de processos físicos, químicos e biológicos. Esse sistema torna-se dinâmico porque está sempre em movimento e seu equilíbrio energético é instável, recebendo a energia solar nas regiões próximas ao equador e perdendo energia através da radiação nas áreas polares. Por ser dinâmico, o clima exige estudo e observação contínuos dos seus elementos, relacionando-os com os fatores climáticos, para que seja possível analisar suas variações e identificar tendências ao longo do tempo. (Hartmann, 2016).

3.1.1 Fatores Climáticos

Fatores climáticos são elementos ou condições naturais que influenciam a formação,

características e variações do clima. Eles atuam de maneira integrada e complexa, determinando as condições ambientais prevalentes, como temperatura, umidade, precipitação e circulação atmosférica, como explica Ayoade (2013). Dentre os principais fatores climáticos que promovem a variação do clima, destacam-se:

Latitude: a posição de uma região em relação ao equador (latitude) é fundamental na quantidade de radiação solar recebida. Quanto mais próximo do equador, maior a incidência de radiação durante o ano, levando a temperaturas elevadas e maior umidade, características do clima tropical. Nas regiões próximas aos polos, a radiação é a e incidente de forma oblíqua, resultando em temperaturas mais baixas e clima frio.

Altitude: regiões situadas em maiores altitudes tendem a apresentar temperaturas mais baixas, um fenômeno explicado pela diminuição da pressão atmosférica com o aumento da elevação. À medida que o ar sobe, ele se expande devido à menor pressão e, conseqüentemente, resfria. Em altitudes elevadas, o ar torna-se mais rarefeito, o que facilita sua perda de calor, resultando em temperaturas mais amenas ou frias.

Maritimidade: refere-se à influência exercida pelos oceanos ou mares sobre o clima das regiões próximas ao litoral. Esse fator climático está diretamente relacionado à proximidade de uma determinada área em relação a grandes massas de água, que atuam como reguladoras térmicas devido à sua elevada capacidade de armazenar e liberar calor de forma gradual. Como resultado, áreas litorâneas tendem a apresentar temperaturas mais estáveis ao longo do ano, com menor amplitude térmica tanto diária quanto sazonal.

Continentalidade: refere-se à influência das porções interiores dos continentes sobre o clima de uma região, sendo caracterizada por uma maior amplitude térmica, ocorrência de temperaturas extremas e menor umidade relativa do ar, em comparação às áreas próximas aos oceanos. Essa condição se deve à baixa capacidade térmica do solo continental, que se aquece e resfria com maior rapidez do que as massas de água.

Revestimento do Solo: refere-se à cobertura superficial do solo, incluindo elementos como a vegetação, camada de matéria orgânica, minerais expostos, e outros tipos de cobertura que influenciam as condições climáticas locais. Os revestimentos do solo afetam processos como a evapotranspiração, a absorção de calor, e a retenção de umidade, impactando assim o clima e o microclima de uma determinada região.

3.1.2 Elementos climáticos

Elementos climáticos são as variáveis essenciais que descrevem o estado do clima de uma região específica. Eles representam os componentes básicos do sistema atmosférico que

podem ser medidos, observados e utilizados para caracterizar as condições climáticas de uma área (Ayoade, 2013). São eles:

Pressão atmosférica: corresponde ao peso exercido por uma coluna de ar disposta verticalmente sobre uma determinada área horizontal da superfície terrestre. Trata-se de um elemento climático dinâmico, cuja variação está diretamente relacionada a diversos fatores, como temperatura do ar, densidade atmosférica, altitude, teor de umidade, período do dia, latitude e condições meteorológicas momentâneas.

Temperatura: pode ser compreendida como a medida da agitação térmica das partículas de um corpo. No caso da atmosfera, a temperatura do ar resulta, principalmente, do aquecimento e resfriamento da superfície terrestre, que absorve a radiação solar e a transfere para o ar adjacente por processos como a condução, convecção e radiação.

Umidade: é o termo mais comumente utilizado para caracterizar a presença de vapor d'água na atmosfera, sendo esse vapor fornecido, em grande parte, pelos processos de evaporação e transpiração das superfícies terrestres e aquáticas. Trata-se de um elemento climático de grande relevância, pois influencia diretamente o comportamento do tempo e do clima. A umidade atmosférica está diretamente associada à formação de nuvens e à ocorrência de precipitações, além de atuar na regulação térmica do ambiente, uma vez que o vapor d'água absorve e armazena radiação solar. Essa capacidade de absorção influencia a sensação térmica percebida pelos organismos vivos, tornando o ar mais abafado em situações de alta umidade e acentuando o desconforto térmico.

Precipitação: tem origem no processo de evaporação da água presente em superfícies terrestres e aquáticas, seguida pela condensação do vapor d'água na atmosfera, formando nuvens que, ao atingirem certo grau de saturação, liberam a água em forma de chuva, neve, granizo ou outros tipos de precipitação.

3.1.3 Clima Urbano

Ao longo da história, as cidades representaram o ápice da organização social e do avanço tecnológico de cada era, emergindo inicialmente como resposta à necessidade de superar desafios relacionados ao acesso à água para agricultura e consumo humano (Neto, 2011). Segundo Hartmann (2016), o clima é essencial para a vida e a civilização, influenciando a distribuição de vegetação, os tipos de habitação, a vestimenta e até o curso da história humana. Além disso, flutuações climáticas e alterações a longo prazo impactam significativamente os sistemas de abastecimento de alimentos, água e energia, sobretudo diante do crescimento populacional.

Com a crescente expansão dos espaços urbanos, a ação humana passou a se manifestar de forma intensa nas cidades por meio de diversas atividades antrópicas. Os contrastes entre o ambiente urbano e o rural tornaram-se cada vez mais evidentes, levando à percepção de que as condições atmosféricas sobre as áreas urbanas diferem sensivelmente daquelas observadas no campo (Monteiro, 1976). A partir disso, no início do século XIX, deu-se início aos primeiros estudos referentes ao clima urbano.

O clima urbano constitui um sistema complexo e característico do ambiente citadino, marcado por alterações significativas nos parâmetros atmosféricos, como a circulação e turbulência do ar, os padrões de dispersão de poluentes, a variação do albedo, o armazenamento de calor nas superfícies urbanas, a redução da evapotranspiração e as mudanças no balanço de energia à superfície (Taha, 1997; Arnfield, 2003; Kanda, 2006 *apud* De Lucena, 2012). O processo de urbanização, ao provocar esses efeitos, gera fenômenos como ilhas de calor, poluição atmosférica e alterações no regime de precipitações, resultando em aumento da produção de calor, inversões térmicas, desconforto térmico, maior consumo de energia, mudanças na ventilação, umidade e precipitações, além de potencializar o desequilíbrio térmico em escala regional (Gomes; Lamberts, 2009).

Portanto, o termo refere-se às condições climáticas de uma área terrestre moldadas por sua urbanização, integradas por um Sistema Climático Urbano (SCU) que opera como um sistema único, interativo, em constante transformação, flexível, ajustável e capaz de autorregulação. Esse sistema engloba o clima local, de origem natural, e a cidade, um elemento social (Monteiro, 1976).

3.1.4 Fatores do Clima Urbano

A etapa inicial de qualquer estudo sobre o clima urbano exige uma investigação detalhada da tipologia do sítio citadino, dos modelos de morfologia urbana e das múltiplas combinações possíveis entre esses elementos. Essas características exibem padrões distintos que se alteram conforme a configuração territorial de cada cidade, gerando diferenças intraurbanas específicas de uma para outra (Alves e Mariano, 2021). Amorim (2010) e Alves e Mariano (2021) destacam que, além das disparidades de temperatura e umidade entre áreas urbanas e rurais, é essencial compreender os mecanismos responsáveis pelas variações existentes no interior das áreas urbanas. Sobre esse assunto Monteiro (1990) compila alguns fatores que interferem negativamente no clima urbano, afetando a qualidade de vida de seus cidadãos, sendo elas:

A Dimensão e Complexidade da Cidade: A escala física e a diversidade de funções de uma cidade influenciam diretamente seus atributos climáticos. Quanto maior e mais complexa for a estrutura urbana, maior será a capacidade de reter calor e gerar variações térmicas internas.

A Estrutura e Morfologia das Edificações: A altura, o volume e a disposição das construções urbanas desempenham papel crucial na modulação do clima local. Edificações elevadas criam corredores de vento, formam "*urban canyons*" que aumentam a reflexão da luz solar, e dificultam a circulação de ar, contribuindo para o aumento de temperaturas próximas ao solo.

A Superfícies e Cores urbanas: As superfícies das cidades, suas cores, materiais e texturas, afetam o clima urbano principalmente por sua capacidade de refletir ou absorver energia solar. Edificações claras ou pavimentos de cores diferentes têm distintos índices de albedo, ou seja, refletem ou absorvem quantidades variadas de radiação solar, levando a diferenças de temperatura superficial.

A Atividades e Dinamismo Urbano: A movimentação de veículos, atividades industriais e o uso de aparelhos de ar-condicionado ou aquecimento representam fontes adicionais de calor na cidade. Esses processos elevam a temperatura do ar, alteram a composição do ar por emissão de poluentes, e intensificam os efeitos de ilha de calor.

O Uso do Solo e Infraestrutura: A distribuição e o tipo de uso do solo, incluindo parques, áreas arborizadas, pavimentos urbanos, e a altura das edificações, são componentes essenciais na determinação do microclima.

3.1.5 Ilhas de Calor

A ilha de calor urbana (ICU) constitui um fenômeno caracterizado pela elevação das temperaturas nas áreas urbanizadas em relação às zonas rurais adjacentes, manifestando-se sobretudo pelo aumento da temperatura do ar nessas regiões (Lucena, 2013). De acordo com Tejas (2012), esse efeito decorre principalmente da aplicação de materiais de construção com alta capacidade de absorção e armazenamento térmico, significativamente superior aos materiais naturais presentes em áreas rurais. Tais materiais, por serem impermeáveis e reduzirem os processos de evapotranspiração, dificultam a dissipação do calor acumulado. Esse comportamento térmico está diretamente relacionado às propriedades de reflexão e dispersão da radiação solar (albedo), as quais variam conforme os materiais empregados na construção civil.

Nessa mesma perspectiva, Ayoade (2013) destaca que as ilhas de calor constituem fenômenos eminentemente urbanos, resultantes da interação de diversos fatores. Entre eles, sobressaem a elevada capacidade térmica dos materiais urbanos, responsáveis por absorver calor durante o dia e liberá-lo gradualmente à noite, a emissão adicional de calor proveniente da combustão de veículos e indústrias, a redução da umidade ocasionada pela canalização da água, a obstrução dos ventos pelas edificações e a dificuldade de perda da radiação infravermelha em razão da rugosidade urbana. Esses elementos combinados intensificam a retenção de calor na camada atmosférica superficial.

Assim, a magnitude da ICU varia em conformidade com o porte da cidade e seu consumo energético, sua localização geográfica, o horário de observação e as condições meteorológicas predominantes, fatores já apontados por Oke (1987) e reafirmados por estudos recentes, como explicado por Santos (2024).

3.2 GEOTECNOLOGIAS APLICADAS AO ESTUDO DO CLIMA

3.2.1 Sensoriamento remoto

O sensoriamento remoto (SR) é uma técnica que possibilita a obtenção de informações sobre objetos, áreas ou fenômenos da superfície terrestre sem a necessidade de contato direto, por meio de sensores instalados em satélites ou aeronaves. Esses sensores registram a radiação eletromagnética (REM) refletida ou emitida pelos alvos, explorando a interação da REM com os materiais da superfície, a qual depende de suas características físicas e químicas, resultando em assinaturas espectrais específicas (Jensen, 2009).

Quando a radiação eletromagnética incide sobre um corpo, ela pode ser refletida, absorvida ou transmitida e, no caso da absorção, a energia tende a ser reemitida, geralmente em comprimentos de onda distintos. Esses processos de emissão, reflexão, transmissão e absorção manifestam-se com intensidades variadas ao longo das diferentes regiões do espectro eletromagnético, conforme as propriedades do material. As bandas espectrais correspondem a intervalos específicos de comprimentos de onda dentro desse espectro e são geralmente denominadas de acordo com a região em que se localizam, como azul, verde, infravermelho próximo ou infravermelho termal. Muitos sistemas sensores registram a energia refletida ou emitida pelos alvos em múltiplas bandas espectrais, permitindo a extração de informações relevantes sobre características físicas, como forma, dimensão, temperatura e cor, e químicas, como a composição. Quando esse registro é realizado por meio de imagens, obtém-se uma imagem distinta para cada banda espectral analisada (Quartaroli *et al*, 2014).

Os sensores utilizados no sensoriamento remoto podem ser classificados em passivos e ativos. Os sensores passivos dependem principalmente da radiação solar refletida pela superfície, enquanto os sensores ativos, como os radares, emitem sua própria radiação artificial e registram o sinal refletido, apresentando a vantagem de operar mesmo sob condições atmosféricas adversas, como a presença de nuvens. Historicamente, o sensoriamento remoto teve início com o uso de câmeras fotográficas, inicialmente voltadas para aplicações militares, incluindo experiências pioneiras como o uso de pombos-correios equipados com câmeras para o registro de áreas estratégicas. Com o avanço tecnológico, envolvendo sensores mais sofisticados, sistemas de transmissão e processamento de dados e veículos lançadores mais eficientes, suas aplicações foram ampliadas para diversas áreas, destacando-se a agricultura, o monitoramento ambiental e o planejamento territorial. Dessa forma, o sensoriamento remoto consolidou-se como uma ferramenta fundamental para o mapeamento e a análise da superfície terrestre, fornecendo informações rápidas, seguras e de alta qualidade (Figueiredo, 2005).

3.2.2 Sistemas de Informação Geográfica (SIG)

Um Sistema de Informação Geográfica (SIG) é definido como um conjunto de processos, sejam manuais ou computacionais, projetados para o armazenamento, gerenciamento e manipulação de dados espacialmente referenciados (Aronoff, 1989; Silva, 2023). Esses dados geográficos caracterizam objetos do mundo real por meio de seu posicionamento em um sistema de coordenadas, seus atributos não visíveis e as relações topológicas que os conectam (Câmara e Ortiz, 1998).

Para Câmara e Ortiz (1998), um Sistema de Informação Geográfica (SIG) pode ser definido como um sistema equipado com quatro grupos de capacidades para lidar com dados georreferenciados: entrada, gerenciamento, manipulação e análise, e saída. Em resumo, as principais características dos SIGs incluem a integração, em uma única base de dados, de informações espaciais provenientes de fontes como dados cartográficos, censitários, cadastro urbano e rural, imagens de satélite, redes e modelos numéricos de terreno; a combinação dessas informações por meio de algoritmos de manipulação para gerar mapeamentos derivados; e a capacidade de consultar, recuperar, visualizar e plotar o conteúdo da base de dados geocodificados.

3.2.3 Zonas Climáticas Locais (ZCL)


As Zonas Climáticas Locais, do Inglês *Local Climate Zones* (LCZ), constituem uma metodologia proposta por Stewart e Oke (2012), destinada a dividir a paisagem urbana em

classes locais com base na morfologia e no uso e ocupação do solo. O conceito foi desenvolvido para oferecer uma classificação padronizada das condições de superfície urbana e rural, facilitando estudos comparativos e a análise do efeito ilha de calor urbana.

A classificação das Zonas Climáticas Locais surgiu como uma resposta à necessidade de aprimorar a consistência e a precisão na caracterização dos ambientes urbanos, que anteriormente eram descritos de forma subjetiva e heterogênea. O sistema foi concebido para ser abrangente, padronizado e aplicável globalmente, permitindo a categorização de diferentes tipos de ambientes com base em propriedades físicas mensuráveis, como altura e densidade das edificações, proporção de cobertura vegetal e características dos materiais de superfície. Desde sua proposição, a ZCL tem evoluído para integrar métodos mais robustos de classificação, fundamentados em métricas objetivas e sensores remotos, ampliando sua capacidade de representar a estrutura térmica e morfológica das cidades. Além disso, o sistema possibilita analisar os efeitos de transformações urbanas ao longo do tempo, oferecendo suporte tanto a estudos retrospectivos quanto a investigações contemporâneas sobre clima urbano e formação de ilhas de calor (Sterwart e Oke, 2012).








As classes do sistema ZCL são compostas por 17 categorias padrões que representam diferentes combinações de estrutura, cobertura e uso do solo urbano e rural (Sterwart e Oke, 2012; Do Nascimento et al. (2024). Essas classes são divididas em dois grandes grupos: os tipos construídos (1 a 10), que descrevem diferentes configurações de edifícios, altura, densidade e materiais de construção; e as classes de cobertura (A a G), que são a características da vegetação, solo exposto, neve ou áreas secas e úmidas. Cada classe é definida por atributos específicos, como altura de edificações, proporção de ocupação do solo, refletância, admitância térmica, entre outros, permitindo uma classificação simplificada e eficaz das áreas urbanas e rurais. As classes são projetadas para serem distintas e fisicamente discretas, facilitando sua identificação em mapas ou fotografias aéreas, embora na prática as condições reais apresentem transições suaves entre zonas adjacentes. Além disso, o sistema permite subclasses para refletir variações temporárias ou particulares de cada área, como cobertura de neve ou seca. Nas Figuras 1 e 2, é possível observar as classificações das ZCLs com base nos tipos construtivos e nas coberturas de solo.

Figura 1 – Classificação das ZCLs com base nos tipos construtivos.

ZCL 1		Edifícios altos compactos	Mistura densa de edifícios altos de até dezenas de histórias. Poucos ou nenhum arranjo livre. A cobertura do solo é em sua maior parte pavimentada. Materiais: pedra, tijolo, madeira e concreto.
ZCL 2		Edifícios médios compactos	Mistura densa de edifícios de altura média (3-9 andares). Poucos ou nenhum arranjo livre. A cobertura do solo é em sua maior parte pavimentada.
ZCL 3		Edifícios baixos compactos	Mistura densa de prédios baixos (1-3 andares). Poucos ou nenhum arranjo livre. A cobertura do solo é em sua maior parte pavimentada.
ZCL 4		Arranjo alto aberto	Arranjo aberto de edifícios altos em áreas espaçadas entre si. Áreas abertas maiores e superfícies pavimentadas limitadas. Materiais: concreto, pedra, tijolo, madeira.
ZCL 5		Arranjo aberto de edifícios médios/altos	Arranjo aberto de edifícios médios e altos com áreas abertas amplas e coberturas de solo naturais. Materiais: concreto, pedra, tijolo, madeira.
ZCL 6		Arranjo baixo aberto	Arranjo aberto de edifícios baixos com áreas abertas entre as edificações. Cobertura do solo mista: pavimentada e natural.
ZCL 7		Edifício baixo e leve	Arranjo aberto de edifícios baixos leves, muitas vezes temporários, geralmente em áreas de ocupação informal. Cobertura do solo: natural em sua maioria.
ZCL 8		Arranjo de grandes galpões	Descrição de edifícios grandes e baixos (galpões) dispostos de forma espaçada ou agrupada. Cobertura do solo: pavimentada em boa parte.
ZCL 9		Construção esparsa	Dispersão de edificações pequenas em grandes áreas, com predominância de cobertura natural.
ZCL 10		Indústrias pesadas	Estruturas grandes e baixas com infraestrutura pesada ao redor (pátios, tanques, áreas pavimentadas). Cobertura do solo: pavimentada ou artificial em grande parte.

Fonte: Adaptado de Stewart e Oke (2012).

Figura 2 – Classificação das ZCLs com base nos tipos de coberturas de solo.

ZCL A		Árvores densas	Paisagem densamente arborizada com árvores dispostas de forma regular. Área de floresta natural, urbana ou parque.
ZCL B		Árvores dispersas	Paisagem com árvores mais espaçadas. A cobertura do solo é uma mistura de vegetação rasteira, solo ou pavimento.
ZCL C		Arbusto, mato	Arranjo aberto de arbustos e árvores curtas e dispersas sobre vegetação rasteira ou solo exposto.
ZCL D		Plantas baixas	Paisagem com gramíneas ou plantas rasteiras, natural ou cultivada. Pouca ou nenhuma presença de árvores.
ZCL E		Rocha nua ou pavimentada	Paisagem sem características naturais ou vegetação, composta por rochas expostas ou superfícies pavimentadas.
ZCL F		Solo nu ou areia	Paisagem extensiva com solo ou areia exposta, sem cobertura significativa.
ZCL G		Água	Corpos d'água: lagos, rios, mares, etc., com superfície predominantemente aquática.

Fonte: Adaptado de Stewart e Oke (2012).

Os resultados do sistema ZCL são disponibilizados por meio de fichas de classificação que descrevem as propriedades físicas de cada zona, incluindo dados de metadados, fotos, gráficos de propriedades da superfície. Além disso, são fornecidos valores quantitativos de parâmetros como estrutura, cobertura, refletância e emissão de calor antropogênico. Essas

fichas são produzidas de forma padronizada a partir de observações de campo, imagens aéreas ou satelitais, e usam tabelas e esquemas para facilitar comparação e comunicação. Além disso, os dados podem ser apresentados em mapas, gráficos e bases de dados acessíveis a investigadores, facilitando análises em estudos de clima urbano, modelagem, e avaliação de mudanças ao longo do tempo. Assim, os resultados são estruturados para suportar não apenas a classificação, mas também a integração com modelos climáticos, análises de ilha de calor, e relatórios científicos, promovendo uma abordagem transparente e padronizada.

3.2.4 Índices Espectrais

Os índices espectrais são derivados de operações aritméticas realizadas pixel a pixel entre os valores de reflectância registrados em diferentes bandas espectrais de uma imagem de sensoriamento remoto orbital. O resultado é um novo raster de banda única no qual cada pixel contém um valor contínuo que expressa a intensidade relativa de um determinado fenômeno biofísico ou de cobertura da superfície (Quartaroli et al. 2014). Os índices utilizados pelo presente trabalho foram:

O Índice Vegetativo por Diferença Normalizada (NDVI), Segundo Quartaroli et al (2014) é um dos indicadores espectrais mais consolidados em sensoriamento remoto, obtido pela razão normalizada entre a reflectância nas bandas do infravermelho próximo (NIR) e do vermelho (RED). Seus valores oscilam entre -1 e +1, sendo que valores elevados (próximos a +1) caracterizam vegetação densa e vigorosa, valores próximos a zero representam superfícies sem vegetação ou solo exposto e valores negativos estão associados principalmente a corpos d'água. A aplicação dessa operação pixel a pixel sobre imagens de reflectância gera um raster contínuo capaz de realçar, com alta sensibilidade, as variações espaciais no vigor e na densidade da cobertura vegetal. Por essa razão, o NDVI é amplamente utilizado em estudos de monitoramento ambiental para estimar o índice de área foliar (IAF), a fração de cobertura vegetal, a produtividade primária bruta e a fração de radiação fotossinteticamente ativa (fPAR) absorvida pelo dossel, constituindo-se em uma ferramenta essencial para a análise da dinâmica da vegetação em áreas urbanas e naturais.

O Índice de Água por Diferença Normalizada (NDWI), foi desenvolvido especificamente para realçar corpos d'água abertos e automatizar a separação entre superfícies hídricas e não hídricas (vegetação e solo). Segundo Brenner e Guasselli (2015), Sua formulação explora três propriedades espectrais distintas: A elevada reflectância da água na banda do verde; A baixa reflectância dos corpos d'água na banda do infravermelho próximo (NIR). O forte contraste gerado pela alta reflectância do NIR em vegetação e solo exposto. Essa combinação

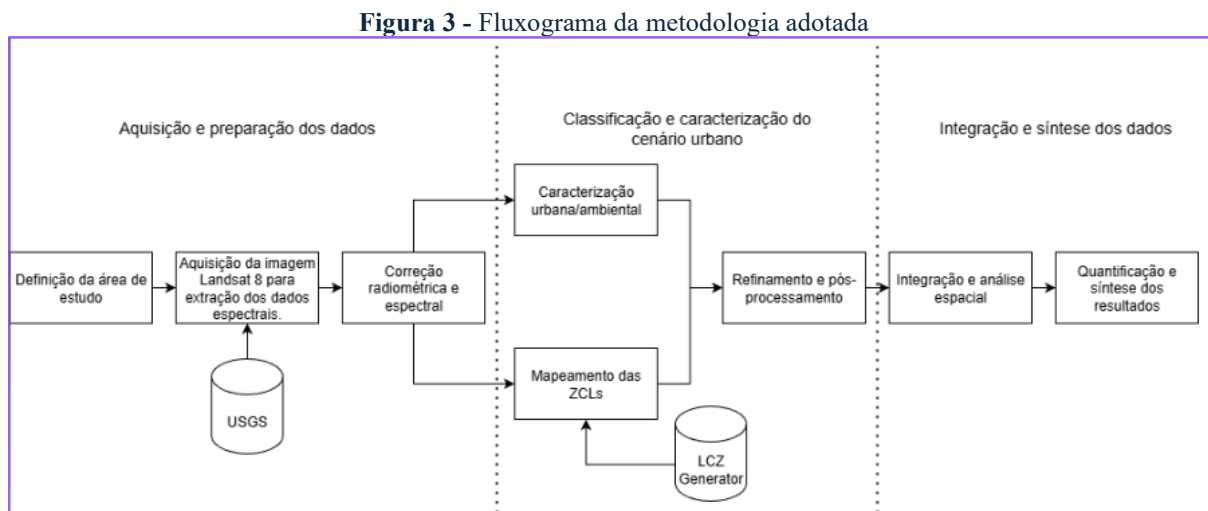
permite que valores positivos elevados do NDWI indiquem com precisão a presença de água livre, tornando o índice uma ferramenta eficiente para o mapeamento automático de rios, lagos, áreas alagadas e delimitação de linhas de costa em imagens de sensoriamento remoto. O Índice de Diferença Normalizada da Água (NDWI), na formulação de McFeeters (1996), apresenta valores que variam entre -1 e $+1$. O autor estabeleceu o valor zero como limiar ideal para a separação entre superfícies hídricas e não hídricas: pixels com $NDWI \geq 0$ são classificados como água (ou superfícies com água livre predominante), enquanto pixels com $NDWI < 0$ representam vegetação, solo exposto ou áreas construídas (McFeeters, 1996; Brubascher e Guaselli, 2015).

O *Índice de Área Construída por Diferença Normalizada* (NDBI) é obtido a partir da combinação das bandas do infravermelho de ondas curtas (SWIR) e do infravermelho próximo (NIR), constituindo-se em importante recurso para a identificação e classificação de superfícies impermeabilizadas em ambientes urbanos. Essa combinação faz com que valores positivos (especialmente $NDBI \geq 0$) indiquem com alta precisão a presença de áreas impermeáveis e ocupação urbana densa, enquanto valores negativos ou próximos de zero representam tipicamente vegetação, corpos d'água ou solo exposto.

O *Índice Built-up* (BUI) que segundo Xu (2008), o NDBI apresenta uma limitação significativa decorrente da similaridade espectral entre superfícies impermeabilizadas e solos expostos nas faixas do infravermelho de ondas curtas (SWIR) e do infravermelho próximo (NIR), o que pode gerar confusão na identificação de áreas efetivamente urbanizadas. Visando superar tal restrição, He et al. (2010) desenvolveram o *Built-up Index* (BUI), um índice aprimorado que estabelece uma relação direta entre o NDBI e o NDVI. Essa integração permite suprimir o sinal proveniente de solos descobertos, que usualmente exibem valores de NDVI baixos semelhantes aos de zonas construídas, e reforçar o contraste entre superfícies impermeáveis (características da ocupação urbana consolidada) e superfícies permeáveis (predominantemente vegetadas). O resultado consiste em uma discriminação mais precisa e robusta das áreas construídas em imagens de sensoriamento remoto, especialmente em contextos tropicais marcados por intensa dinâmica de uso e cobertura do solo.

4. METODOLOGIA

A Figura 3 traz a síntese dos procedimentos metodológicos realizados no desenvolvimento do presente trabalho.

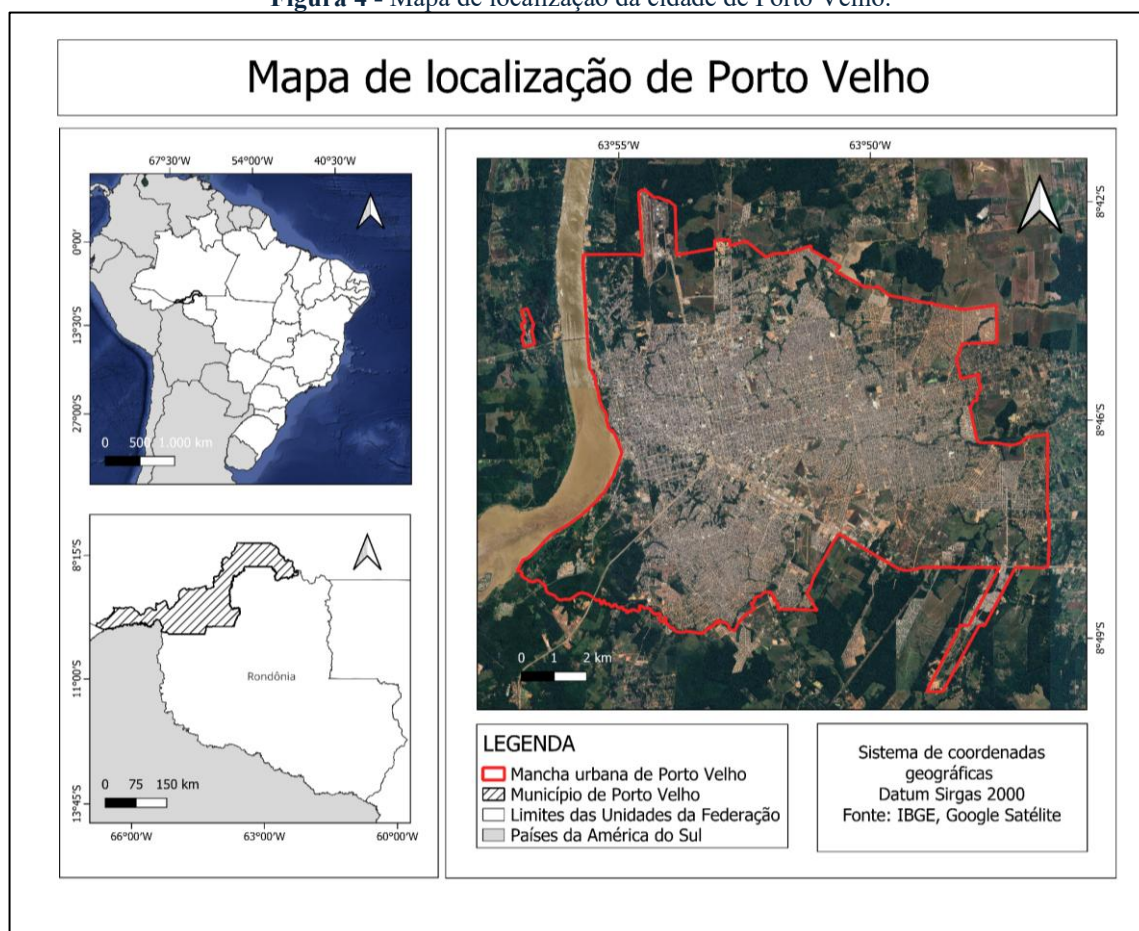


Fonte: Autor (2025).

4.1 ÁREA DE ESTUDO

A cidade de Porto Velho localiza-se ao norte do estado de Rondônia, na mesorregião Madeira-Guaporé. De acordo com o censo do ano de 2022, o município possui uma população estimada em 514.873 pessoas (IBGE, 2025), distribuídas em 71 bairros. O perímetro urbano da cidade de Porto Velho possuía, no ano de 2019, aproximadamente 133,96 km² (Porto Velho, 2022). Na Figura 4 é possível visualizar a delimitação da área em estudo.

Figura 4 - Mapa de localização da cidade de Porto Velho.



Fonte: Autor (2025).

4.2 MAPEAMENTO DAS CLASSES ZCLs

O mapeamento das classes de Zonas Climáticas Locais foi realizado com o auxílio do software *Google Earth*, utilizando como referência o *template* de treinamento disponibilizado pela plataforma *LCZ Generator*, no âmbito do projeto WUDAPT. As amostras destinadas à aplicação da metodologia foram selecionadas de modo a contemplar as áreas mais densamente urbanizadas do município de Porto Velho, assegurando tanto a cobertura integral do território municipal quanto a representatividade das principais características urbanas locais. Após a definição e a coleta das amostras, a área de treinamento foi organizada e submetida à plataforma no formato KML, possibilitando o processamento e a classificação das ZCLs.

A plataforma *LCZ Generator* produziu um mapa detalhado contendo a classificação das zonas climáticas locais do ambiente urbano analisado, acompanhado de uma avaliação da acurácia da classificação. Além disso, foram geradas fichas técnicas que descreveram as propriedades físicas de cada zona climática, incluindo metadados, fotografias ilustrativas e

gráficos que detalham as características específicas da superfície, como cobertura do solo e padrões de ocupação urbana. As imagens resultantes passaram por um processo de preparação e refinamento no software QGIS, envolvendo etapas como a vetorização das classes identificadas, ajustes geométricos e, quando necessário, a reestruturação das categorias.

4.3 CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL E URBANA VIA ÍNDICES ESPECTRAIS

A primeira etapa para a caracterização do cenário citadino de Porto Velho consistiu na obtenção da imagem orbital e das bandas espectrais necessárias para a geração dos índices utilizados na análise, por meio da plataforma Earth Explorer, administrada pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS). A cena selecionada, datada de 11 de julho de 2025, pertence ao conjunto Landsat e corresponde à órbita/ponto 232/66, assegurando cobertura adequada e atualizada da área de estudo.

Após a aquisição das bandas, foi realizado o pré-processamento necessário para assegurar a coerência radiométrica dos dados empregados na classificação da área de estudo. Essa etapa incluiu a correção espectral das bandas 3 (verde), 4 (vermelho), 5 (infravermelho próximo - NIR) e 6 (Infravermelho de ondas curtas - SWIR) do sensor Landsat 8, ajustando seus valores de reflectância para condições padronizadas de análise. A correção foi aplicada utilizando a seguinte fórmula, Equação 1:

Equação 1.

$$\frac{(M_p \times Q_{cal} - A_p)}{\sin(\text{sun_elevation} \times \frac{\pi}{180})}$$

Onde:

M_p: Reflectance_mult_band_4;

Q_{cal}: Valor digital da imagem;

A_p: Reflectance_add_band_4.

Para concluir essa etapa, as imagens corrigidas foram recortadas para a área de estudo, aplicando-se uma zona de amortecimento de 1 km a partir do perímetro. Esse procedimento teve como finalidade evitar a perda de informações nas bordas e assegurar que toda a zona de interesse fosse plenamente contemplada no processamento subsequente.

4.3.1 Procedimentos para a classificação dos índices

Os índices espectrais NDVI, NDWI, NDBI e BUI foram calculados no módulo Calculadora Raster do QGIS a partir das bandas do sensor OLI do Landsat 8, utilizando as Equações de 2 a 5:

Equação 2.

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{RED}}{\text{NIR} + \text{RED}}$$

Onde:

NIR: reflectância no infravermelho próximo;

RED: reflectância da banda espectral vermelha.

Equação 3.

$$\text{NDWI} = \frac{\text{GREEN} - \text{NIR}}{\text{GREEN} + \text{NIR}}$$

Onde:

GREEN: reflectância da banda espectral verde;

NIR: reflectância no infravermelho próximo.

Equação 4.

$$\text{NDBI} = \frac{\text{SWIR} - \text{NIR}}{\text{SWIR} + \text{NIR}}$$

Onde:

WIR: reflectância no infravermelho de ondas curtas

NIR: reflectância no infravermelho próximo

Equação 5.

$$\text{BUI} = \text{NDBI} - \text{NDVI}$$

Onde:

NDBI: Índice de Área Construída por Diferença Normalizada;

NDVI: Índice Vegetativo por Diferença Normalizada.

Em seguida, cada índice foi reclassificado em classes temáticas adequadas ao contexto urbano-ambiental de Porto Velho, conforme os intervalos apresentados nas Tabelas 1, 2, 3 e 4.

Tabela 1 - Classes de NDVI.

Classes de NDVI	
Intervalo	Classe
$-1 < \text{NDVI} \leq 0$	Água
$0 < \text{NDVI} \leq 0,2$	Área urbanizada
$0,2 < \text{NDVI} \leq 0,35$	Solo exposto
$0,35 < \text{NDVI} \leq 0,46$	Vegetação rala
$0,46 < \text{NDVI} \leq 0,63$	Vegetação aberta
$0,63 < \text{NDVI} \leq 1$	Vegetação densa

Fonte: Autor (2025).

Tabela 2 - Classes de NDWI.

Classes de NDWI	
Interval	Classe
$-1 < \text{NDWI} \leq -0,3$	Seca
$-0,3 < \text{NDWI} \leq 0,0$	Seca moderada
$0 < \text{NDWI} \leq 0,2$	Umidade
$0,2 < \text{NDWI} \leq 1$	Superfícies de água

Fonte: Autor (2025).

Tabela 3 - Classes de NDBI.

Classes de NDBI	
Interval	Classe
$-1 < \text{NDBI} \leq 0$	Vegetação
$0 < \text{NDBI} \leq 0,05$	Urbano baixa densidade
$0,05 < \text{NDBI} \leq 0,12$	Urbano média densidade
$0,12 < \text{NDBI} \leq 1$	Urbano alta densidade

Fonte: Autor (2025).

Tabela 4 - Classes de BUI.

Classes de BUI	
Interval	Classe
$-1 \leq \text{BUI}$	Cobertura natural
$-1,0 < \text{BUI} \leq -0,5$	Matriz vegetada
$-0,5 < \text{BUI} \leq 0,0$	Zona de transição vegetação-urbana
$0,0 < \text{BUI} \leq 0,3$	Matriz edificada em expansão
$0,3 < \text{BUI}$	Área urbana consolidada

Fonte: Autor (2025).

Por fim, os dados matriciais reclassificados foram convertidos para formato vetorial (poligonização) para possibilitar o recorte preciso pelo limite urbano de Porto Velho, evitando perdas nas bordas. A partir dos polígonos gerados, elaboraram-se mapas temáticos individuais e tabelas de áreas e percentuais de cada classe, permitindo a análise integrada da cobertura vegetal, da umidade/superfícies hídricas e das áreas construídas no município.

4.4 INTEGRAÇÃO DOS ÍNDICES ESPECTRAIS COM AS ZONAS CLIMÁTICAS LOCAIS

Como etapa final, realizou-se a integração espacial dos mapas temáticos de NDVI, NDWI, NDBI e BUI com o mapa de Zonas Climáticas Locais de Porto Velho. Esse cruzamento foi executado por meio da ferramenta Intersecção do QGIS, preservando os atributos de ambas as camadas e gerando polígonos que combinam a classe de cada índice espectral com a respectiva ZCL.

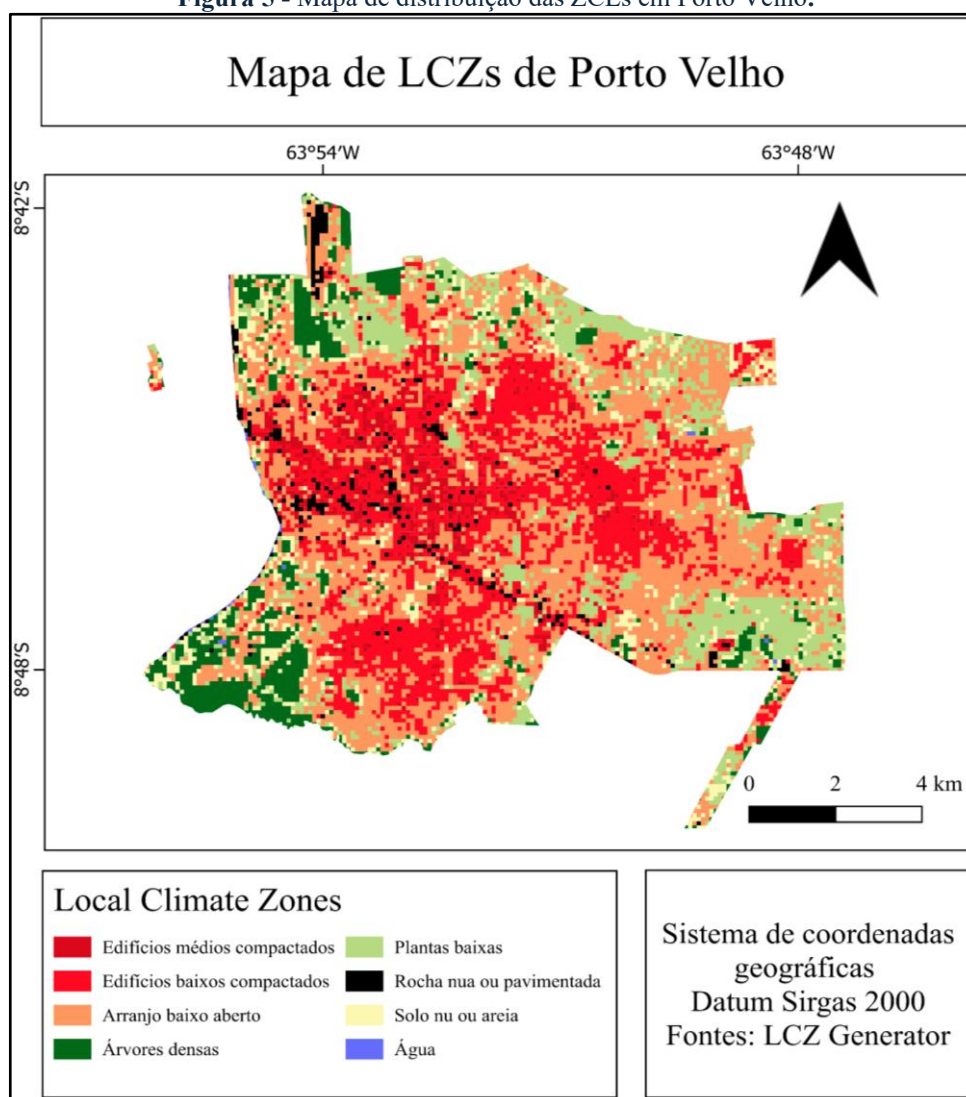
A partir dos polígonos resultantes, calculou-se a área ocupada por cada classe dos quatro índices dentro de cada Zona Climática Local. Esses valores foram organizados em tabelas de contingência, permitindo a análise quantitativa da distribuição percentual das classes de cobertura vegetal, umidade/superfícies hídricas e áreas construídas em cada tipo de ZCL. Tal procedimento possibilitou caracterizar, de forma detalhada e espacialmente explícita, a composição físico-ambiental das diferentes zonas climáticas locais que estruturam o tecido urbano de Porto Velho.

5. RESULTADOS

5.1 DISTRIBUIÇÃO DAS ZONAS CLIMÁTICAS LOCAIS EM PORTO VELHO

A aplicação metodologia adotada possibilitou a realização do mapeamento das ZCLs, para a cidade de Porto Velho, Rondônia, bem como mensurar a influência do processo de configuração delas a partir da espacialização dos índices radiométricos, NDVI, NDWI, NDBI e BUI. Os resultados apresentados nesta seção sintetizam a configuração espacial do ambiente urbano de Porto Velho e as propriedades físicas associadas a cada classe identificada. O processamento realizado pelo LCZ Generator, complementado pelo refinamento das imagens no QGIS, permitiu obter uma representação detalhada da estrutura urbana, destacando padrões de densidade construtiva, cobertura vegetal e características superficiais. A partir dessas informações, é possível compreender com maior precisão a distribuição espacial das ZCLs e suas implicações para o clima urbano local. A Figura 5 e a Tabela 5 trazem a distribuição espacial e quantitativa das classes de ZCL identificadas na cidade estudada, permitindo visualizar tanto a configuração territorial dessas zonas quanto suas proporções relativas.

Figura 5 - Mapa de distribuição das ZCLs em Porto Velho.



Fonte: Autor (2025)

Tabela 5 - Distribuição das classes de ZCL em Porto Velho

Distribuição das classes de ZCL em Porto Velho			
Categoria (ZCL)	Legenda	Área (km²)	%
2	Edifícios médios compactados	7,8	5,96
3	Edifícios baixos compactados	31,39	23,98
6	Arranjo baixo aberto	49,75	38,00
A	Árvores densas	10,36	7,91
D	Plantas baixas	17,67	13,50
E	Rocha nua ou pavimentada	3,15	2,41
F	Solo nu ou areia	10,58	8,08
G	Água	0,21	0,16

Fonte: Autor (2025).

Os resultados evidenciam que a cidade de Porto Velho, Rondônia, apresenta uma configuração espacial marcada pela predominância de áreas urbanas de baixa densidade e por setores de densidade moderada. Esses padrões urbanos coexistem com remanescentes vegetados e trechos ainda em processo de ocupação, compondo um mosaico complexo de usos e coberturas da superfície. Essa diversidade estrutural reflete a dinâmica de expansão característica do município e influencia diretamente o comportamento térmico e climático do ambiente urbano.

A cidade de Porto Velho apresenta predominância da classe ZCL 6, caracterizada pelo arranjo baixo e aberto, a qual ocupa aproximadamente 38% da área mapeada. Essa classe está associada principalmente a bairros residenciais periféricos e a áreas de expansão urbana recente, concentrando-se de forma mais expressiva nas Zonas Leste e Sul, conforme a divisão urbana do município. O ZCL 6 caracteriza-se por edificações térreas ou de baixa altura, espaçamento regular entre unidades habitacionais e presença significativa de vegetação intralote, configurando um tecido urbano menos adensado. Do ponto de vista microclimático, essa combinação de menor densidade construtiva e maior permeabilidade superficial favorece a atenuação de temperaturas e melhora o conforto térmico local, em comparação com zonas urbanas mais compactas (Fernandes e Masiero, 2020)

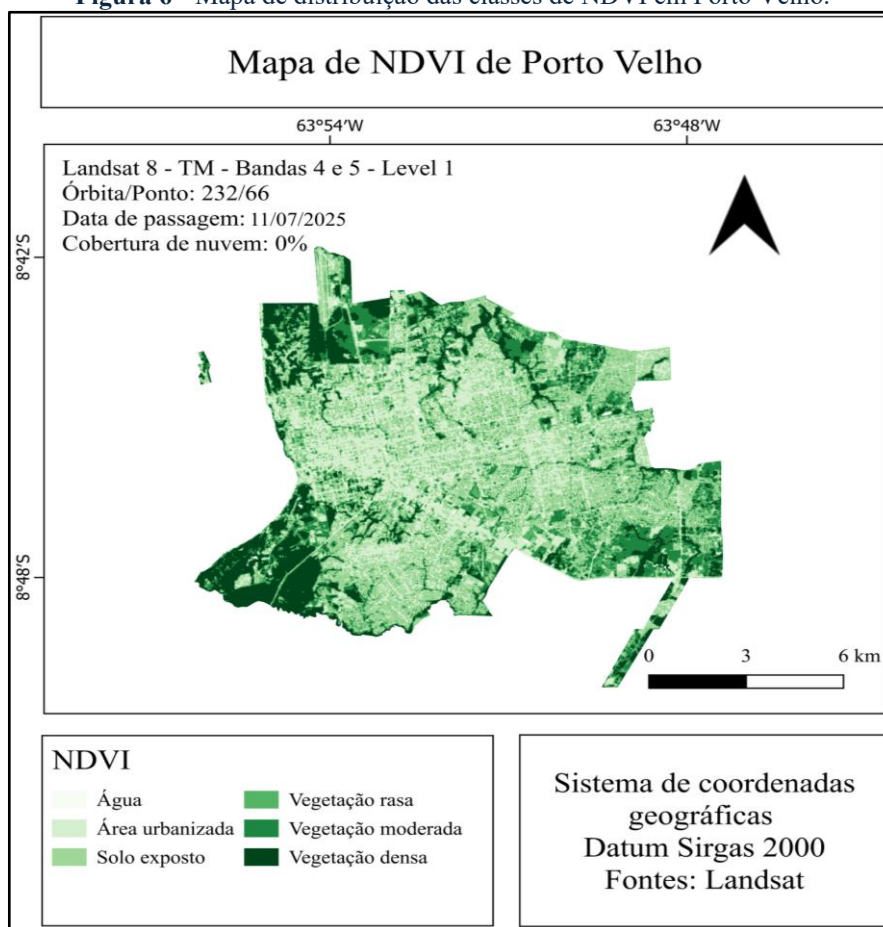
As classes ZCL 2 e ZCL 3, correspondentes a edifícios médios compactos e baixos compactos, abrangem juntas a 29,94% da área mapeada e concentram-se nos núcleos urbanos mais consolidados, especialmente ao longo dos principais eixos viários. A elevada densidade construtiva, a reduzida permeabilidade superficial e a baixa presença de vegetação nessas zonas favorecem forte retenção de calor e restringem os mecanismos naturais de resfriamento. Essas características tornam os ambientes compactos particularmente propensos à intensificação da ilha de calor urbana, conforme demonstrado por Stewart e Oke (2012), que identificam as ZCLs compactas como unidades térmicas críticas na modulação das temperaturas urbanas. Assim, essas classes desempenham papel central na configuração das dinâmicas térmicas de Porto Velho.

As classes naturais ZCLs A e D, árvores densas e plantas baixas, representam a maior parcela entre essas categorias, correspondendo a 21,40% da área mapeada. Elas se distribuem em manchas contínuas de vegetação na porção sudoeste do município e em fragmentos dispersos no interior da malha urbana, exercendo função essencial na moderação térmica local. A ZCL F, solo nu ou areia, com 8,08%, ocorre de forma fragmentada em áreas de construção, terrenos baldios e zonas recentemente desmatadas, configurando setores suscetíveis ao aquecimento superficial. A ZCL E, rocha exposta ou pavimentada, corresponde a 2,41% da área

e concentra-se predominantemente em superfícies impermeabilizadas vinculadas a áreas industriais e estacionamentos, contribuindo para a intensificação de ilhas de calor em escala local. Por fim, a ZCL G, água, apresenta a menor representatividade, com apenas 0,16%, distribuindo-se em pequenos corpos hídricos e trechos estreitos de igarapés

5.2 DISTRIBUIÇÃO DAS CLASSES DE NDVI EM PORTO VELHO

A distribuição espacial do NDVI em Porto Velho revela um padrão marcado pela presença significativa de superfícies pouco vegetadas ou sem cobertura vegetal, intercaladas com manchas de vegetação densa que se concentram especialmente em regiões periféricas e setores ainda pouco urbanizados. Quando analisados conjuntamente os resultados obtidos, observa-se um cenário ambiental urbano caracterizado por contrastes marcantes entre áreas impermeabilizadas, solos expostos e remanescentes de vegetação. A Figura 6 e a Tabela 6 trazem a distribuição espacial e quantitativa das classes de NDVI identificadas no município, permitindo visualizar tanto a configuração territorial dessas classes quanto suas proporções relativas.

Figura 6 - Mapa de distribuição das classes de NDVI em Porto Velho.

Fonte: Autor (2025).

Tabela 6 – Distribuição das classes de NDVI em Porto Velho.

Distribuição das classes de NDVI em Porto Velho			
Classe	Legenda	Área (km ²)	%
1	Água	0,24	0,18
2	Área urbanizada	28,6	21,85
3	Solo exposto	46,62	35,61
4	Vegetação rasa	17,08	13,05
5	Vegetação moderada	18,9	14,44
6	Vegetação densa	19,48	14,88

Fonte: Autor (2025).

A classe de maior representatividade é o solo exposto, correspondendo a 35,61% do território, equivalente a 46,62 km². Essa categoria abrange extensas áreas com baixa ou nula cobertura vegetal, distribuídas de forma difusa ao longo da malha urbana e especialmente concentradas em regiões em expansão ou sujeitas a processos de supressão vegetal. Sua

expressiva área indica a presença de grandes superfícies descobertas, muitas vezes associadas a processos de transformação do uso do solo.

As classes associadas à vegetação, por sua vez, apresentam distribuição mais fragmentada. A vegetação rasa, corresponde 13,05%, vegetação moderada, com 14,44%, e a vegetação densa perfazendo 14,88%, juntas somam cerca de 42% ou 55,46 km² do território. Exibindo padrões espaciais distintos. A vegetação densa se concentra de forma marcante tanto nas bordas sul e noroeste da cidade, onde se formam manchas contínuas associadas a áreas menos urbanizadas e com maior preservação da cobertura vegetal. Já a vegetação moderada e a vegetação rasa ocorrem como fragmentos inseridos na malha urbana e também em faixas periféricas, compondo um mosaico de áreas verdes em diferentes estágios de conservação ou ocupação. A classe água, por sua vez, representa apenas 0,18% da área (0,24 km²) e corresponde a pequenos corpos hídricos e trechos estreitos de igarapés distribuídos pelo território.

5.2.1 Distribuição das classes de NDVI nas ZCLs

O cruzamento entre o NDVI e as classes de ZCL permitiu compreender como diferentes tipologias urbanas e naturais se relacionam com a cobertura vegetal em Porto Velho. De modo geral, verificam-se padrões coerentes com a estrutura física das zonas: áreas urbanas compactas apresentam baixa vegetação, áreas abertas possuem distribuição mais equilibrada entre classes de NDVI, e zonas naturais concentram vegetação moderada a densa. O Apêndice A traz o resumo de como estão distribuídas as classes de NDVI nas nas Zonas Climáticas Locais em Porto Velho.

A ZCL 2, edificações médias compactas, e a ZCL 3, edificações baixas compactas, são amplamente dominadas por áreas urbanizadas e solo exposto, que juntas ultrapassam 90% de suas superfícies, caracterizando setores densamente construídos e com baixa presença de vegetação. A ZCL 6, edificações baixas abertas, apresenta maior heterogeneidade estrutural, marcada pela forte presença de vegetação rasa, moderada e densa, refletindo a configuração aberta típica de bairros residenciais de baixa densidade. Em contrapartida, as zonas naturais ZCL A, árvores densas, e ZCL D, vegetação rasteira, exibem predominância expressiva de cobertura vegetal, densa no caso da ZCL A e moderada na ZCL D, com apenas pequenas inserções de solo exposto ou áreas urbanizadas. As ZCLs E, superfície rochosa ou pavimentada e F, solo exposto ou areia, apresentam composição mista, combinando solo exposto, vegetação em diferentes estágios e pequenas parcelas urbanizadas, caracterizando ambientes intermediários e sujeitos a mudanças rápidas. Por fim, a ZCL G, massa d'água, embora classificada como água, apresenta variação nos valores de NDVI devido à influência das

margens vegetadas e ao tamanho reduzido de seus corpos hídricos, conforme os escritos de Stewart e Oke (2012).

A análise integrada das classes de NDVI e das ZCLs reforça os resultados encontrados por Akbari e Shinzato (1997, 2009), que apontam que a ausência de vegetação contribui para a formação do efeito de ilha de calor, ao comprometer mecanismos fundamentais de redução da temperatura nas cidades. No contexto urbano de Porto Velho, Rondônia, esse padrão torna-se evidente, pois as zonas climáticas mais suscetíveis a ilhas de calor intensas apresentam presença significativamente menor de vegetação.

5.3 DISTRIBUIÇÃO DAS CLASSES DE NDWI EM PORTO VELHO

A distribuição espacial do NDWI em Porto Velho demonstrou um padrão amplamente marcado pela presença significativa de superfícies secas ou com baixa umidade superficial (99,8%), Figura 7 e Tabela 7, intercaladas com manchas muito restritas de umidade e água que se concentram quase exclusivamente no leito do Rio Madeira e em trechos residuais de várzeas, perfazendo apenas 0,26 km². Portanto, os resultados obtidos, revelou um cenário urbano-ambiental caracterizado por contrastes marcantes entre áreas impermeabilizadas, solos secos e remanescentes mínimos de superfícies úmidas.

5.3.1 Distribuição das classes de NDWI nas ZCLs.

A análise integrada do NDWI com as ZCLs identificou como as diferentes tipologias urbanas respondem aos padrões de umidade superficial em Porto Velho. A ZCL 2, edificações médias compactas e a ZCL 3, edificações baixas compactas, apresentam predominância superior a 95% das classes “seca moderada” e “seca”, conforme Apêndice B. Essas zonas formam ambientes densamente urbanizados, com baixa capacidade de retenção hídrica superficial. A distribuição observada reflete o alto nível de impermeabilização, que reduz a infiltração e acelera a evaporação da água disponível. A ZCL 6, edificações baixas abertas, apresenta comportamento distinto, com predominância da classe “seca” em mais de 70% de sua área. Esse padrão, segundo o trabalho de Stewart e Oke (2012), indica maior permeabilidade e maior exposição do solo, características típicas de áreas abertas de baixa densidade, onde a água infiltra ou evapora rapidamente. A heterogeneidade interna desta zona também permite pequenas ocorrências de áreas classificadas como “seca moderada”, associadas a variações locais de cobertura e uso do solo.

As zonas naturais ZCL A, floresta densa, e ZCL D, Floresta baixa/arbustiva, reforçam o padrão predominante de baixa umidade superficial, com mais de 89% de suas áreas classificadas como “seca”. Esse comportamento resulta da elevada permeabilidade e da forte evapotranspiração características das superfícies vegetadas no período seco amazônico, momento em que são obtidas as imagens de satélites LANDSAT. As ZCLs E, vegetação de plantas baixas, e F, solo exposto, exibem respostas distintas. A ZCL E apresenta maior variabilidade entre as classes “seca” e “seca moderada”, refletindo sua heterogeneidade estrutural, marcada por vegetação rala, trechos parcialmente expostos e pequenas interferências antrópicas. Em contraposição, a ZCL F apresenta comportamento uniforme, sendo quase totalmente dominada pela classe “seca”, o que evidencia um ambiente homogêneo e com muito baixa capacidade de retenção hídrica.

De modo geral, a análise integrada entre NDWI e ZCL revela uma relação aparentemente contraditória, mas coerente quando considerados os mecanismos que controlam a umidade e o comportamento térmico das superfícies. A ZCL 6, embora mais seca segundo o NDWI, é menos propensa ao fenômeno de ilha de calor devido à maior presença de vegetação e ao solo mais permeável, que favorecem a evapotranspiração e reduzem o acúmulo de calor. Por outro lado, as ZCLs 2 e 3, mais vulneráveis ao aquecimento urbano, aparecem com valores relativamente mais altos de “seca moderada”, não porque sejam mais úmidas, mas porque a forte impermeabilização retém umidade superficial sem promover resfriamento efetivo. Assim, os padrões observados demonstram que a umidade captada pelo NDWI não necessariamente

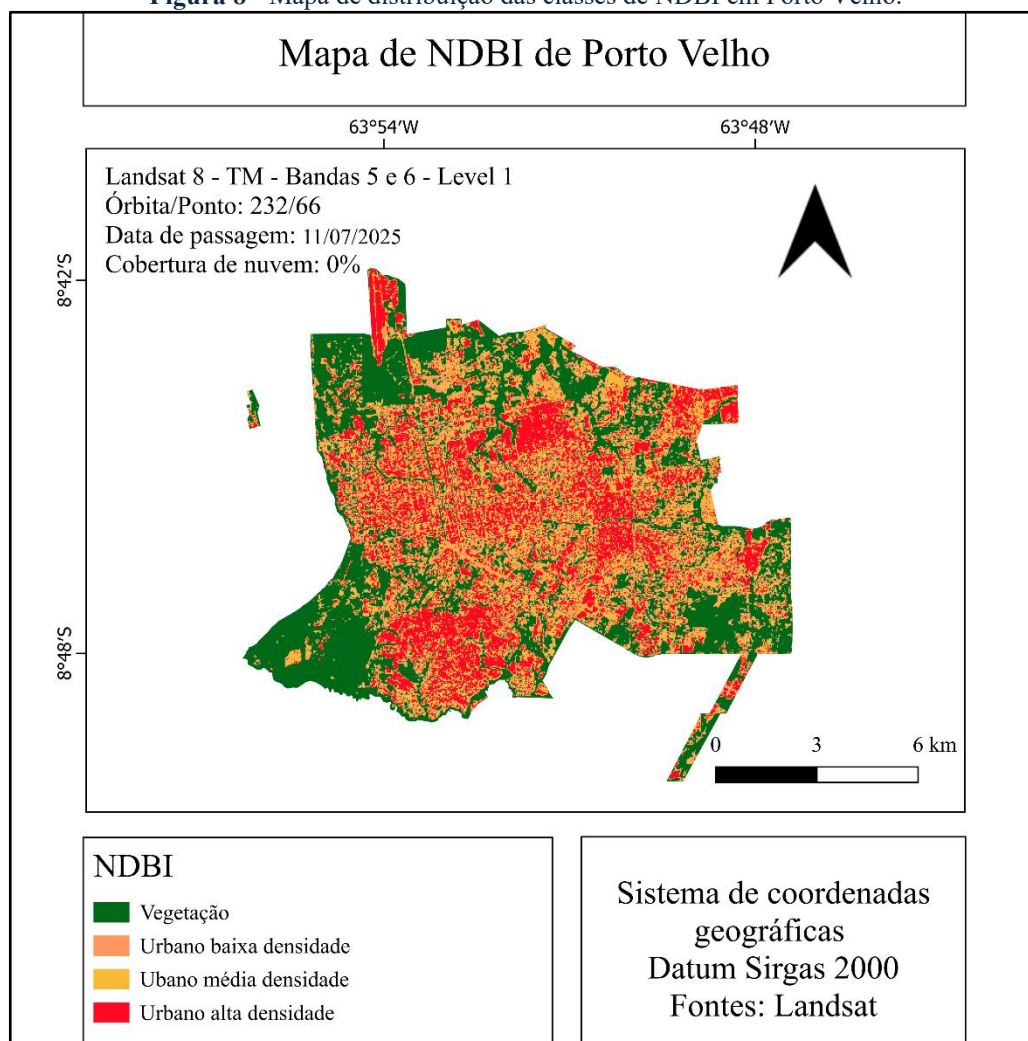
corresponde ao melhor desempenho térmico, reforçando o papel central da permeabilidade e da cobertura vegetal no controle das ilhas de calor.

Além disso, é fundamental considerar a influência do regime climático regional sobre os resultados obtidos. A imagem do satélite LANDSAT utilizada na análise corresponde ao mês de julho, período caracterizado pela estação seca na Amazônia, quando a redução das precipitações e o aumento da insolação favorecem a diminuição da umidade superficial em diferentes tipos de cobertura. Esse contexto sazonal tende a intensificar os valores associados às classes “seca” e “seca moderada” do NDWI, inclusive em áreas vegetadas, potencializando os contrastes entre superfícies urbanizadas e naturais. Dessa forma, o período seco amazônico atua como um fator condicionante importante na interpretação dos resultados, devendo ser considerado na análise dos padrões de umidade e na compreensão da dinâmica térmica urbana de Porto Velho.

5.4 DISTRIBUIÇÃO DAS CLASSES DE NDBI EM PORTO VELHO

A Figura 8 e a Tabela 8 apresentam a distribuição espacial e a participação percentual das classes de NDBI no território urbano, evidenciando sua organização territorial e sua contribuição relativa na área estudada. A vegetação constitui a classe mais representativa, abrangendo 36,42% da superfície analisada, 7,68 km². Sua ocorrência concentra-se principalmente nas porções sul e noroeste, além de formar manchas contínuas em áreas periféricas ainda pouco urbanizadas. Esses remanescentes vegetados atuam como importantes reguladores microclimáticos, ao reduzir a continuidade das superfícies impermeáveis e funcionar como zonas de atenuação térmica no ambiente urbano, (Stewart e Oke, 2012).

Figura 8 - Mapa de distribuição das classes de NDBI em Porto Velho.



Fonte: Autor (2025).

Tabela 8 – Distribuição das classes de NDBI nas ZCLs em Porto Velho.

Distribuição das classes de NDBI em Porto Velho			
Classe	Legenda	Área (km ²)	%
1	Vegetação	47,68	36,42
2	Urbano baixa densidade	16,41	12,53
3	Urbano média densidade	31,89	24,36
4	Urbano alta densidade	34,94	26,69

Fonte: Autor (2025)

As classes, urbano média densidade, 24,36%, e urbano alta densidade, 26,69%, juntas somam 51,05% da cidade de Porto Velho, evidenciando o predomínio de superfícies construídas e pavimentadas na malha urbana central e em bairros consolidados. A urbanização de alta densidade distribui-se de maneira contínua sobre grande parte da área urbana, refletindo

setores com forte impermeabilização do solo, ocupação intensiva e menores índices de cobertura vegetal. A classe Urbano baixa densidade, que representa 12,53% da área, isto é, 16,41 km², aparece de forma mais fragmentada e distribuída principalmente nas bordas leste e sudeste do município, acompanhando a expansão recente da malha urbana. Esses setores correspondem a zonas em processo de ocupação, com quadras abertas, pavimentação parcial e presença residual de vegetação, funcionando como áreas de transição entre os espaços urbanizados e os remanescentes florestais.

5.4.1 Distribuição das classes de NDBI nas Zonas Climáticas Locais.

O cruzamento entre os valores de NDBI e as classes de ZCL evidenciaram que as ZCLs 2 e 3, edificações médias compactas e edificações baixas compactas, verifica-se a maior predominância de superfícies associadas a alto adensamento construtivo. Na ZCL 2, as classes urbanas média intensidade, e urbana alta intensidade somam mais de 84,36% da área total, revelando um ambiente amplamente impermeabilizado. Na ZCL 3 esse padrão é ainda mais acentuado, pois a classe urbano alta intensidade representa 55,08%, seguida por urbano média intensidade com 29,95%. Assim, mais de 85% dessa zona é formada por superfícies construídas. Esses números reforçam o caráter densamente urbanizado dessas ZCLs, nas quais a vegetação ocupa proporções reduzidas, apenas 10,90% na ZCL 2 e 5,80% na ZCL 3. Já a ZCL 6, que representa um arranjo baixo e mais aberto, demonstra maior heterogeneidade. Embora apresente valores consideráveis de urbano média intensidade, 29,83%, e urbano alta intensidade, 20,92%, ainda mantém uma parcela elevada de vegetação, equivalente a 31,76%. Essa distribuição evidencia uma morfologia menos compacta e maior presença de superfícies naturais quando comparada às ZCLs 2 e 3.

No referente às ZCLs naturais, a ZCL A, composta por árvores densas, a vegetação representa 98,07% da área total. Nas ZCLs D e F, predominadas por formações arbustivas e vegetação mista, as proporções vegetadas alcançam 56,99% e 78,07%, respectivamente. Esses valores evidenciam a baixa presença de superfícies artificiais e um ambiente com maior capacidade de resfriamento superficial por meio da evapotranspiração, resultando em temperaturas mais amenas e menor acúmulo de calor. A ZCL E, formada por vegetação baixa e áreas abertas, apresenta uma composição intermediária, com 16,83% de cobertura vegetal e participação expressiva das classes urbanas de média densidade, com 27,94%, e de alta densidade, com 39,05%. Esse equilíbrio mostra um território em transição, no qual o avanço de materiais construtivos começa a influenciar significativamente o microclima local, embora

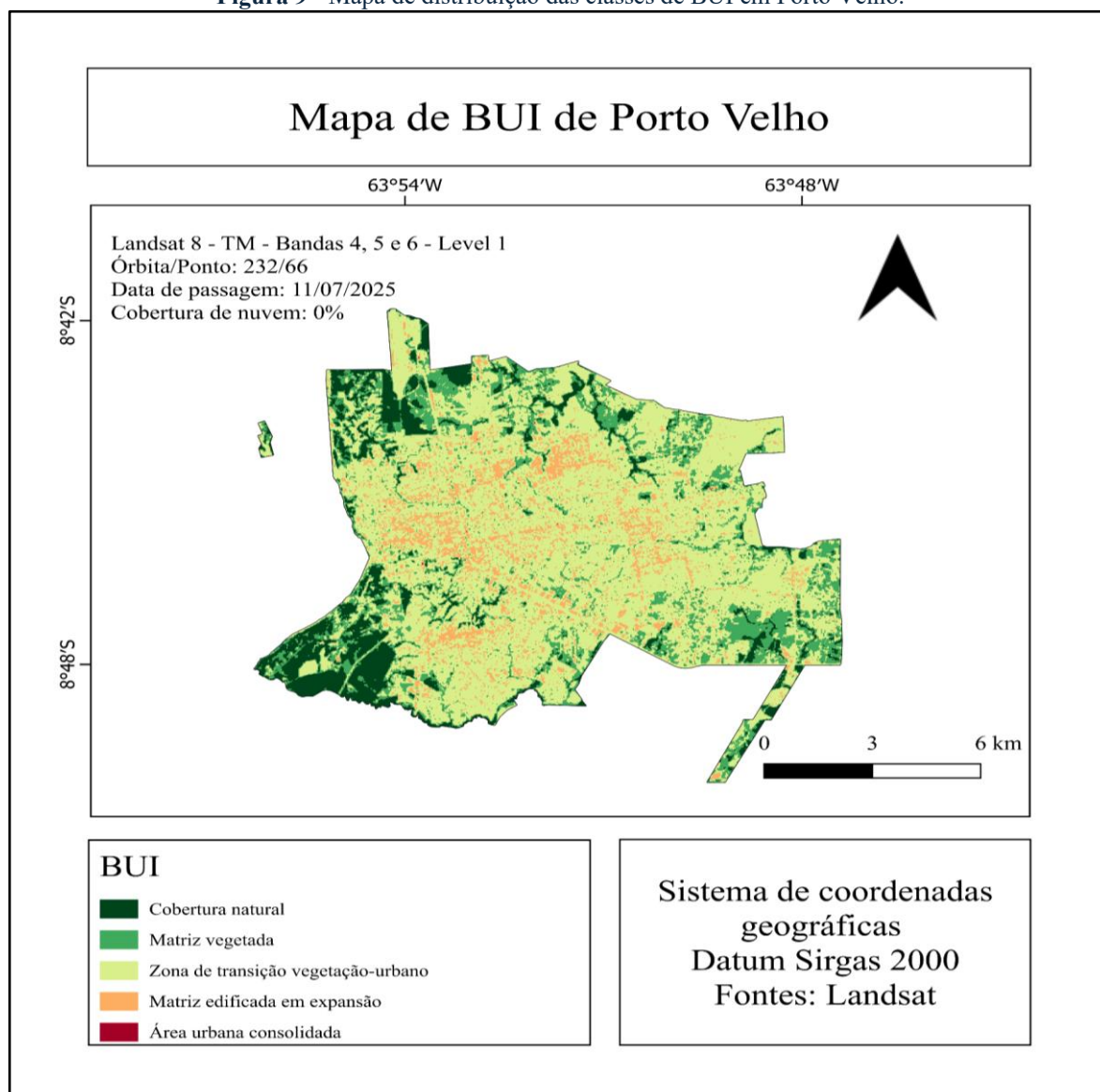
ainda coexistam trechos de vegetação capazes de mitigar parcialmente os efeitos térmicos (Stewart e Oke, 2012).

Dessa forma, fica evidente que o aumento do desconforto térmico em Porto Velho está relacionado não apenas à redução da vegetação, mas sobretudo à expansão de superfícies urbanas compostas por materiais com alta capacidade de armazenamento de calor, como concreto, asfalto e telhas cerâmicas ou metálicas. Nas ZCLs densas (2 e 3), onde 70% a 85% do solo é urbanizado, a combinação de elevada ocupação do solo, verticalização moderada e baixa ventilação favorece a absorção e a liberação lenta de calor, caracterizando ilhas de calor urbanas. Já nas ZCLs intermediárias, como a 6, a maior presença de vegetação e a menor proporção de superfícies artificiais reduzem o acúmulo térmico, evidenciando que o tipo e a quantidade de materiais de construção são determinantes do comportamento térmico local (Stewart e Oke, 2012). Nas zonas naturais (ZCL A, D e F), a predominância de superfícies permeáveis e vegetadas promove evapotranspiração e resfriamento convectivo, funcionando como moderadores térmicos. Esses resultados reforçam a necessidade de estratégias de mitigação, como ampliação de áreas verdes, uso de pavimentos de alta refletância e aplicação de materiais construtivos capazes de reduzir a absorção de calor.

5.5 DISTRIBUIÇÃO DAS CLASSES DE BUI EM PORTO VELHO

A Figura 9 e a Tabela 9 sintetizam a distribuição espacial e a representatividade das classes do Índice *Built-up* no perímetro urbano de Porto Velho, evidenciando como essas categorias se organizam no território e qual é sua contribuição proporcional e absoluta na área mapeada.

Figura 9 - Mapa de distribuição das classes de BUI em Porto Velho.



Fonte: Autor (2025)

Tabela 9 – Distribuição das classes de BUI nas ZCLs em Porto Velho.

Distribuição das classes de BUI em Porto Velho			
Classe	Legenda	Área (km ²)	%
1	Cobertura natural	13,09	10,00
2	Matriz vegetada	24,05	18,37
3	Zona de transição vegetação-urbano	81,28	62,08
4	Matriz edificada em expansão	11,6	8,86
5	Área urbana consolidada	0,02	0,02

Fonte: Autor (2025).

A classe de maior representatividade no BUI de Porto Velho é a Zona de Transição Vegetação-Urbano, que corresponde a 62,08% da área mapeada, 81,28 km², Apêndice C. Essa predominância reforçam os resultados encontrados pelos índices NDVI, NDWI e NDBI e indica uma cidade marcado por áreas intermediárias entre superfícies vegetadas e ocupação urbana, refletindo um padrão típico de expansão periférica, onde coexistem fragmentos vegetados, loteamentos recentes e ocupações ainda não completamente consolidadas. As classes vegetadas, Cobertura Natural, 10,00%, e Matriz Vegetada, 18,37%, que somam 28,37% do território, 37,14 km², concentrando-se principalmente nas regiões sul, sudoeste e noroeste de Porto Velho, além de aparecerem de forma mais densa nas áreas menos urbanizadas próximas às bordas da área estudada.

Em contraponto às extensas áreas vegetadas e de transição, as superfícies efetivamente urbanizadas apresentam participação bastante reduzida na composição territorial de Porto Velho. A classe Matriz Edificada em Expansão, que ocupa 8,86 % da área analisada, 11,60 km², exhibe clara concentração linear ao longo dos principais eixos viários da cidade, como a Avenida Governador Jorge Teixeira, Avenida Prefeito Chiquilito Erse, Avenida Amazonas, Avenida Calama, Avenida. José Amador dos Reis, Avenida Jatuarana e entre outros. Esses corredores funcionam como vetores estruturantes do crescimento urbano recente, promovendo a abertura de novos loteamentos, a implantação de redes de infraestrutura e o progressivo adensamento construtivo, como demonstrado por Souza (2019). Tal configuração espacial reforça a tendência de expansão urbana orientada por vias arteriais, que articulam os bairros emergentes à malha urbana preexistente. Por fim, a classe Área urbana consolidada revela representatividade praticamente marginal, correspondendo a apenas 0,02 % do território (0,02 km²). Essa reduzida expressão evidencia a ausência de um núcleo central compacto até 2025, mas extensas zonas de alta densidade edificada e baixa permeabilidade espaçadas de maneira difusa.

5.5.1 Distribuição das classes de BUI nas Zonas Climáticas Locais.

Assim como a análise realizada com o NDBI, o cruzamento do *Built-up Index* (BUI) com as classes de ZCLs revelou, que os distintos graus de impermeabilização, a cobertura vegetal remanescente e os materiais predominantes nas edificações modulam a distribuição espacial do estresse térmico em Porto Velho, evidenciando a relação direta entre o adensamento construtivo e as propriedades térmicas de cada zona climática local.

O Apêndice D apresenta a distribuição das classes do Built-up Index (BUI) nas Zonas Climáticas Locais, permitindo identificar o grau de impermeabilização e de adensamento construtivo em Porto Velho. As ZCLs 2 e 3, de morfologia compacta, são amplamente

dominadas pela Zona de Transição Vegetação–Urbano (80,38% e 75,15%), acompanhada por significativa presença de matriz edificada em expansão; nessas zonas, mais de 95% das superfícies possuem algum nível de urbanização, enquanto a vegetação não ultrapassa 3%, configurando ambientes densos e termicamente críticos. A ZCL 6, embora também marcada pela transição (75,76%), apresenta maior heterogeneidade estrutural, com cerca de 20% de cobertura vegetal, indicando menor compactação. A ZCL E, por sua vez, mostra padrão intermediário, combinando alta proporção de transição (68,89%) e expansão edificada (26,03%), refletindo um território em processo de transformação. Por fim, as zonas naturais, especialmente na ZCL A, a vegetação é quase absoluta (97%), enquanto nas ZCLs D e F predomina a matriz vegetada associada a cobertura vegetal. Esses setores apresentam baixa intervenção antrópica e favorecem o resfriamento superficial, funcionando como importantes moderadores térmicos.

CONCLUSÃO

A integração entre as ZCLs e os índices espectrais revela a forte influência do processo de urbanização de Porto Velho sobre a assinatura biofísica da superfície. As zonas compactas ZCL 2 e ZCL 3, 29,94% da área, NDVI < 0,20, NDWI seco em >95% das superfícies, NDBI elevado e BUI positivo, caracterizando ambientes altamente impermeáveis e com intenso acúmulo térmico.

Em oposição, as zonas naturais ZCL A e ZCL D, 21,40%, apresentam NDVI > 0,60, NDWI seco >89%, NDBI e BUI negativo, evidenciaram elevada permeabilidade, forte evapotranspiração e função moderadora do microclima.

A ZCL 6, 38% da área urbana apresentou padrão intermediário, NDVI 0,30 a 0,50, NDWI seco em 70%, NDBI moderado e BUI próximo de zero, refletindo, assim, um mosaico de urbanização difusa.

As ZCLs E e F reforçam a heterogeneidade morfológica: a ZCL E combina 68,89% de superfícies de transição e 26,03% de matriz edificada em expansão, enquanto a ZCL F revela NDWI seco >90% e BUI elevado, associados a solo exposto contínuo.

Portanto, os padrões de comportamento dos índices radiométricos nas ZCLs demonstram que o avanço urbano concentra sinais espectrais de aquecimento nas zonas densamente construídas e preserva assinaturas de resfriamento nas áreas naturais, configurando um gradiente térmico coerente com o ritmo e a forma da urbanização de Porto Velho.

REFERÊNCIAS

- ALEIXO, Natacha Cíntia Regina. **Clima urbano e saúde: uma análise a partir de indicadores socioambientais.** *Revista GeoUECE*, Fortaleza, v. 3, n. 4, p. 194-216, 2014.
- ALVES, Washington Silva; MARIANO, Zilda de Fátima. **A influência dos fatores geocológicos e geourbanos no clima urbano de Iporá-GO: uma análise a partir dos métodos de correlação e regressão linear.** *Revista Brasileira de Climatologia*, Curitiba, v. 19, 2016.
- ARONOFF, Stanley. **Geographical information systems: a management perspective.** Ottawa: WDL Publications, 1989.
- AYOADE, J. O. **Introdução à climatologia para os trópicos.** 17. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2013.
- BRENNER, V. C.; GUASSELLI, Laurindo Antônio. **Índice de diferença normalizada da água (NDWI) para identificação de meandros ativos no leito do canal do rio Gravataí/RS–Brasil.** Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto-SBSR, João Pessoa-PB, Brasil, v. 25, 2015.
- CÂMARA, Gilberto; ORTIZ, Manoel Jimenez. **Sistemas de informação geográfica para aplicações ambientais e cadastrais: uma visão geral.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 1998. Anais [...]. p. 59-88.
- DE LUCENA, Andrews José. **Notas conceituais e metodológicas em clima urbano e ilhas de calor.** 2013. Dissertação (Mestrado).
- DO NASCIMENTO, Francisco Ivam Castro et al. **Identificação de zonas climáticas locais na cidade de Rio Branco.** *E&S Engineering and Science*, v. 13, n. 4, p. 1-14, 2024.
- FIGUEIREDO, Divino. **Conceitos básicos de sensoriamento remoto.** São Paulo, 2005.
- GOMES, Marcos Antônio Silvestre et al. **Arborização e conforto térmico no espaço urbano: estudo de caso nas praças públicas de Presidente Prudente (SP).** *Caminhos de Geografia*, Uberlândia, v. 7, n. 10, p. 94-106, 2003.
- GOMES, Patrícia Silva; LAMBERTS, Roberto. **O estudo do clima urbano e legislação urbanística: considerações a partir do caso Montes Claros–MG.** *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 9, n. 1, p. 73-91, 2009.
- GUIMARÃES, G. M.; SOARES FILHO, Britaldo Silveira (org.). **Modelagem da dinâmica intra-urbana no bairro Savassi, em Belo Horizonte.**
- HARTMANN, Dennis L. **Global physical climatology.** 2. ed. Amsterdam: Newnes, 2016.
- JENSEN, John R. **Remote sensing of the environment: an earth resource perspective.** 2. ed. Pearson Education India, 2009.
- MARTELLI, Anderson. **Influência da arborização urbana no microclima e conforto térmico de uma área central do município do Espírito Santo do Pinhal-SP.** *PhD Scientific*

Review, v. 3, n. 6, p. 8-22, 2023.

MONTEIRO, Carlos Augusto de Figueiredo. **Adentrar a cidade para tomar-lhe a temperatura.** *Geosul*, Florianópolis, n. 9, p. 61-79, 1990.

MONTEIRO, Carlos Augusto de Figueiredo. **Teoria e clima urbano.** São Paulo, 1976.

NETO, João Lima Sant'Anna. **O clima urbano como construção social:** da vulnerabilidade polissêmica das cidades enfermas ao sofisma utópico das cidades saudáveis. *Revista Brasileira de Climatologia*, Curitiba, v. 8, 2011.

POLIDORI, Mauricio Couto. **Crescimento urbano e ambiente:** um estudo exploratório sobre as transformações e o futuro da cidade. 2005. Dissertação (Mestrado).

QUARTAROLI, Carlos Fernando; VICENTE, Luiz Eduardo; ARAÚJO, LS de. **Sensoriamento remoto.** Geotecnologias e geoinformação. Brasília, DF: Embrapa, p. 61-79, 2014.

REBOITA, M. S. et al. **Entendendo o tempo e o clima na América do Sul.** *Terræ Didactica*, Campinas, v. 8, n. 1, p. 34-50, 2012.

RIBEIRO, Helena; PESQUERO, Célia Regina; COELHO, Micheline de Sousa Zanotti Stagliorio. **Clima urbano e saúde:** uma revisão sistematizada da literatura recente. *Estudos Avançados*, São Paulo, v. 30, n. 86, p. 67-82, 2016.

SANTOS, Ana Teena Bulcão dos. **Estudo numérico do impacto da expansão urbana nas ilhas de calor em cidades do nordeste brasileiro.** 2024. Dissertação (Mestrado).

SANTOS, Milton. **A natureza do espaço:** técnica e tempo, razão e emoção. São Paulo: Edusp, 2002.

SILVA, Jaelisson do Espírito Santo et al. **A utilização do sistema de informação geográfico (SIG) como ferramenta de gestão na distribuição da rede de esgoto no conjunto João Sampaio II.** 2023. Dissertação (Mestrado).

SHINZATO, Paula. **O impacto da vegetação nos microclimas urbanos.** 2009. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SOUZA, Reginaldo Martins da Silva de. Vulnerabilidade socioambiental na cidade de Porto Velho/RO: uma análise da estruturação de lugares intraurbanos e a formação de áreas de risco. 2019. Tese (Doutorado em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente) – Universidade Federal de Rondônia, Porto Velho, 2019.

TEJAS, Graziela Tosini. **Análise espaço-temporal do clima urbano da cidade de Porto Velho, RO.** 2012. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Rondônia.

FERNANDES, Maria Eugênia; MASIERO, Érico. **Relação entre conforto térmico urbano e Zonas Climáticas Locais.** *Urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana*, v. 12, p. e20190247, 2020.

APÊNDICES

APÊNDICE A - Distribuição das classes de NDVI nas ZCLs em Porto Velho.

NDVI			
ZCL 2 - Edifícios médios compactos			Área total
			7,8
Classe	Legenda	Área (km)	%
1	Água	0,01	0,13
2	Área urbanizada	3,86	49,49
3	Solo exposto	3,42	43,85
4	Vegetação rasa	0,39	5,00
5	Vegetação moderada	0,11	1,41
6	Vegetação densa	0,01	0,13
ZCL 3 - Edifícios baixos compactos			Área total
			31,39
Classe	Legenda	Área (km)	%
1	Água	0,03	0,10
2	Área urbanizada	14,64	46,64
3	Solo exposto	14,64	46,64
4	Vegetação rasa	1,42	4,52
5	Vegetação moderada	0,51	1,62
6	Vegetação densa	0,15	0,48
ZCL 6 - Arranjo baixo aberto			Área total
			49,75
Classe	Legenda	Área (km)	%
1	Água	0,04	0,08
2	Área urbanizada	6,24	12,54
3	Solo exposto	23,15	46,53
4	Vegetação rasa	10,19	20,48
5	Vegetação moderada	7,46	14,99
6	Vegetação densa	2,67	5,37
ZCL A - Árvores densas			Área total
			10,36
Classe	Legenda	Área (km)	%
1	Água	0,01	0,10

2	Área urbanizada	0,04	0,39
3	Solo exposto	0,13	1,25
4	Vegetação rasa	0,2	1,93
5	Vegetação moderada	0,74	7,14
6	Vegetação densa	9,25	89,29
ZCL D - Plantas baixas			Área total
			17,67
Classe	Legenda	Área (km)	%
1	Água	0,01	0,06
2	Área urbanizada	1,1	6,23
3	Solo exposto	3,29	18,62
4	Vegetação rasa	3,69	20,88
5	Vegetação moderada	7,3	41,31
6	Vegetação densa	2,28	12,90
ZCL E - Rocha nua ou pavimentada			Área total
			3,15
Classe	Legenda	Área (km)	%
1	Água	0,07	2,22
2	Área urbanizada	1,96	62,22
3	Solo exposto	0,81	25,71
4	Vegetação rasa	0,18	5,71
5	Vegetação moderada	0,09	2,86
6	Vegetação densa	0,04	1,27
ZCL F - Solo nu ou areia			Área total
			10,58
Classe	Legenda	Área (km)	%
1	Água	0,02	0,19
2	Área urbanizada	0,73	6,90
3	Solo exposto	1,15	10,87
4	Vegetação rasa	1	9,45
5	Vegetação moderada	2,66	25,14
6	Vegetação densa	5,04	47,64
ZCL G - Água			Área total

			0,21
Classe	Legenda	Área (km)	%
1	Água	0,06	28,57
2	Área urbanizada	0,04	19,05
3	Solo exposto	0,03	14,29
4	Vegetação rasa	0,02	9,52
5	Vegetação moderada	0,03	14,29
6	Vegetação densa	0,03	14,29

Fonte: Autor (2025)

APÊNDICE B - Distribuição das classes de NDWI nas ZCLs em Porto Velho.

NDWI			
ZCL 2 - Edifícios médios compactos			Área total
			7,8
Classe	Legenda	Área (km)	%
1	Seca	1,26	16,15
2	Seca moderada	6,53	83,72
3	Umidade	0,01	0,13
4	Superfícies de água	0	0,00
ZCL 3 - Edifícios baixos compactos			Área total
			31,39
1	Seca	6,59	20,99
2	Seca moderada	24,78	78,94
3	Umidade	0,02	0,06
4	Superfícies de água	0	0,00
ZCL 6 - Arranjo baixo aberto			Área total
			49,75
1	Seca	34,94	70,23
2	Seca moderada	14,77	29,69
3	Umidade	0,03	0,06
4	Superfícies de água	0,01	0,02
ZCL A - Árvores densas			Área total
			10,36
1	Seca	10,27	99,13
2	Seca moderada	0,08	0,77
3	Umidade	0,01	0,10
4	Superfícies de água	0	0,00
ZCL D - Plantas baixas			Área total
			17,67
1	Seca	15,87	89,81
2	Seca moderada	1,75	9,90

3	Umidade	0,04	0,23
4	Superfícies de água	0,01	0,06
ZCL E - Plantas baixas			Área total
			3,15
1	Seca	0,65	20,63
2	Seca moderada	2,45	77,78
3	Umidade	0,04	1,27
4	Superfícies de água	0,01	0,32
ZCL F - Solo nu ou areia			Área total
			10,58
1	Seca	9,65	91,21
2	Seca moderada	0,92	8,70
3	Umidade	0,01	0,09
4	Superfícies de água	0	0,00
ZCL F - Água			Área total
			0,21
1	Seca	0,08	38,10
2	Seca moderada	0,07	33,33
3	Umidade	0,02	9,52
4	Superfícies de água	0,04	19,05

Fonte: Autor (2025).

APÊNDICE C - Distribuição das classes de NDBI nas ZCLs em Porto Velho.

NDBI			
ZCL 2 - Edifícios médios compactos			Área total
			7,8
Classe	Legenda	Área (km)	%
1	Vegetação	0,85	10,90
2	Urbano baixa intensidade	1,14	14,62
3	Urbano média intensidade	2,71	34,74
4	Urbano alta intensidade	3,09	39,62
ZCL 3 - Edifícios baixos compactos			Área total
			31,39
1	Vegetação	1,82	5,80
2	Urbano baixa intensidade	2,88	9,17
3	Urbano média intensidade	9,4	29,95
4	Urbano alta intensidade	17,29	55,08
ZCL 6 - Arranjo baixo aberto			Área total
			49,75
1	Vegetação	15,8	31,76
2	Urbano baixa intensidade	8,71	17,51
3	Urbano média intensidade	14,84	29,83
4	Urbano alta intensidade	10,41	20,92
ZCL A - Árvores densas			Área total
			10,36
1	Vegetação	10,16	98,07
2	Urbano baixa intensidade	0,07	0,68
3	Urbano média intensidade	0,07	0,68
4	Urbano alta intensidade	0,06	0,58
ZCL D - Plantas baixas			Área total
			17,67
1	Vegetação	10,07	56,99
2	Urbano baixa intensidade	2,44	13,81
3	Urbano média intensidade	3,15	17,83
4	Urbano alta intensidade	2,01	11,38

ZCL E - Plantas baixas			Área total
			3,15
1	Vegetação	0,53	16,83
2	Urbano baixa intensidade	0,52	16,51
3	Urbano média intensidade	0,88	27,94
4	Urbano alta intensidade	1,23	39,05
ZCL F - Solo nu ou areia			Área total
			10,58
1	Vegetação	8,26	78,07
2	Urbano baixa intensidade	0,64	6,05
3	Urbano média intensidade	0,83	7,84
4	Urbano alta intensidade	0,85	8,03
ZCL F - Água			Área total
			0,21
1	Vegetação	0,2	95,24
2	Urbano baixa intensidade	0,01	4,76
3	Urbano média intensidade	0	0,00
4	Urbano alta intensidade	0	0,00

Fonte: Autor (2025).

APÊNDICE D - Distribuição das classes de BUI nas ZCLs em Porto Velho.

BUI			
ZCL 2 - Edifícios médios compactos			Área total
			7,8
Classe	Legenda	Área (km)	%
1	Cobertura vegetal	0,01	0,13
2	Matriz vegetada	0,16	2,05
3	Zona de transição vegetação-urbano	6,27	80,38
4	Matriz edificada em expansão	1,36	17,44
5	Área urbana consolidada	0	0,00
ZCL 3 - Edifícios baixos compactos			Área total
			31,39
1	Cobertura vegetal	0,06	0,19
2	Matriz vegetada	0,61	1,94
3	Zona de transição vegetação-urbano	23,59	75,15
4	Matriz edificada em expansão	7,11	22,65
5	Área urbana consolidada	0,01	0,03
ZCL 6 - Arranjo baixo aberto			Área total
			49,75
1	Cobertura vegetal	1,2	2,41
2	Matriz vegetada	9,15	18,39
3	Zona de transição vegetação-urbano	37,69	75,76
4	Matriz edificada em expansão	1,72	3,46
5	Área urbana consolidada	0	0,00
ZCL A - Árvores densas			Área total
			10,36
1	Cobertura vegetal	8,47	81,76
2	Matriz vegetada	1,58	15,25
3	Zona de transição vegetação-urbano	0,3	2,90
4	Matriz edificada em expansão	0,01	0,10
5	Área urbana consolidada	0	0,00
ZCL D - Plantas baixas			Área total
			17,67

1	Cobertura vegetal	0,89	5,04
2	Matriz vegetada	7,93	44,88
3	Zona de transição vegetação-urbano	8,55	48,39
4	Matriz edificada em expansão	0,31	1,75
5	Área urbana consolidada	0	0,00
ZCL E - Plantas baixas			Área total
			3,15
1	Cobertura vegetal	0,02	0,63
2	Matriz vegetada	0,13	4,13
3	Zona de transição vegetação-urbano	2,17	68,89
4	Matriz edificada em expansão	0,82	26,03
5	Área urbana consolidada	0	0,00
ZCL F - Solo nu ou areia			Área total
			10,58
1	Cobertura vegetal	3,31	31,29
2	Matriz vegetada	4,4	41,59
3	Zona de transição vegetação-urbano	2,61	24,67
4	Matriz edificada em expansão	0,25	2,36
5	Área urbana consolidada	0	0,00
ZCL F - Água			Área total
			0,21
1	Cobertura vegetal	0,03	14,29
2	Matriz vegetada	0,07	33,33
3	Zona de transição vegetação-urbano	0,1	47,62
4	Matriz edificada em expansão	0,01	4,76
5	Área urbana consolidada	0	0,00

Fonte: Autor (2025)