

Capítulo IV

CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ILHAS DE CALOR EM CIDADES COSTEIRAS: ESTUDO DE CASO DO MUNICÍPIO DE RIO GRANDE, RIO GRANDE DO SUL – BRASIL





CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ILHAS DE CALOR EM CIDADES COSTEIRAS: ESTUDO DE CASO DO MUNICÍPIO DE RIO GRANDE, RIO GRANDE DO SUL – BRASIL

Alexandre Espíndola de Felipe^{1, 2}; Miguel da Guia Albuquerque^{1, 2}; Jean Marcel de Almeida Espinoza³

¹Universidade Federal do Rio Grande, Programa de Pós-Graduação em Geografia, alesdef@gmail.com (autor correspondente)

²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, *Campus* Rio Grande, migueldaguia@gmail.com

³Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, *Campus* Rio Garopaba, espinoza.almeida@gmail.com

RESUMO

A rápida urbanização das cidades tem trazido alterações no padrão de uso e de cobertura dos solos, principalmente pela substituição de áreas verdes por áreas impermeáveis. O avanço nas tecnologias de sensoriamento remoto tem permitido novas possibilidades de observação de parâmetros relacionados ao conforto térmico e à formação de ilhas de calor em diferentes arranjos urbanos. Este estudo buscou caracterizar como ocorreu a evolução das áreas de ilhas de calor, na cidade do Rio Grande, RS, nos anos de 2013 a 2023. A partir de um pré-processamento das imagens do sensor *Landsat 8*, do cálculo da Temperatura de Superfície (Ts), e utilizando os índices NDVI e NDBI, foi possível mapear a distribuição espacial das ilhas de calor ao longo de 10 anos, de forma automática, utilizando o *plugin Icetool*. Os resultados demonstraram uma tendência de expansão das ilhas de calor, especialmente nas áreas centrais, industriais e periferias urbanizadas, em função do crescimento urbano acelerado e da redução da cobertura vegetal. A comparação dos dados de 2013, 2016, 2020 e 2023 evidenciou que a intensificação do fenômeno está associada ao adensamento de áreas construídas e à fragmentação de áreas verdes. Além disso, dados meteorológicos indicaram uma redução da velocidade média dos ventos e um aumento da umidade relativa do ar, fatores que podem agravar o desconforto térmico urbano. Este estudo destaca a importância do monitoramento contínuo das ilhas de calor, como subsídio à formulação de políticas públicas que integrem planejamento urbano, conservação ambiental e adaptação climática em cidades costeiras como Rio Grande.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto, *Landsat 8*, *Plugin Icetool*, Processamento de imagens.

ABSTRACT

The quick urbanization of cities has significantly altered land use and land cover patterns, primarily driven by the replacement of vegetated areas with impervious surfaces. Advances in remote sensing technologies have provided new opportunities for the observation and analysis of parameters related to urban thermal comfort and the development of urban heat islands (UHI) across diverse urban morphologies.

This study aimed to characterize the temporal evolution of urban heat island areas in Rio Grande, Rio Grande do Sul, Brazil, from 2013 to 2023. By pre-processing Landsat 8 imagery, calculating Land Surface Temperature (LST), and employing the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and the Normalized Difference Built-up Index (NDBI), it was possible to automatically map the spatial distribution of UHIs using the *Icetool* plugin. The findings revealed a consistent trend of expansion in UHI areas, particularly concentrated in central, industrial, and newly urbanized peripheral zones, driven by rapid urban growth and the decline of vegetative cover. Comparative analyses of data from 2013, 2016, 2020, and 2023 demonstrated that the intensification of UHIs is closely associated with increased urban densification and fragmentation of green spaces. Additionally, meteorological data indicated a decrease in average wind speeds and an increase in relative humidity, factors that may contribute to heightened urban thermal discomfort. This study underscores the urgent need for continuous UHI monitoring as a key strategy to inform integrated public policies addressing urban planning, environmental preservation, and climate adaptation, particularly in coastal urban environments such as the Rio Grande.

Keywords: Remote sensing, Landsat 8, *Icetool* Plugin, Processing images.

INTRODUÇÃO

O clima exerce influência sobre o homem, assim como o homem também desempenha um papel importante na dinâmica climática, através de suas várias atividades (NOBREGA & LEMOS, 2011). Quando nos referimos ao clima urbano, OKE (1995) destaca que este é o resultado das variações provocadas pelo processo de urbanização na superfície terrestre e das características da atmosfera de um determinado local. Segundo o Relatório Mundial das Cidades, elaborado pela Organização das Nações Unidas (ONU), estima-se que 70% da população mundial esteja vivendo nos centros urbanos até 2050, sobretudo nas metrópoles

(UN, 2022). Nesse sentido, é importante que os governos trabalhem em soluções urbanísticas em consonância com a Agenda Global 2030, de modo a minimizar os impactos causados pelo aumento da concentração urbana e do crescimento não planejado das cidades.

Assim como em ambientes predominantemente urbanos, as construções situadas próximas às zonas costeiras exercem papel importante na dinâmica climática. Entre os anos 1980 e 2020, DRITSAS (2020) já destacava um aumento da população costeira, de modo que, no Brasil, essa ocupação tem acontecido de forma desordenada e não planejada (KLEIN & SHORT, 2016). No que se refere a infraestruturas ou construções resultantes dessas ocupações, SCHERER (2013) destaca que as iniciativas de gestão dos espaços litorâneos, muitas vezes, não correspondem ao crescente uso e às dinâmicas, as quais esses espaços são submetidos, podendo ocasionar problemáticas relacionadas à formação de ilhas de calor.

As ilhas de calor são definidas como um fenômeno que ocorre quando, no ambiente urbano, têm-se grandes áreas edificadas e temperaturas

mais elevadas, quando comparadas às regiões periféricas do perímetro urbano (LEAL, 2012). Tendo em vista que o ambiente construído tem efeitos diretos na saúde e no bem-estar humano (SOLEYMANPOUR et al., 2015), o presente estudo buscou caracterizar as áreas de formação de ilhas de calor no município costeiro do Rio Grande, Extremo Sul do Brasil, nos anos de 2013 a 2023.

O município do Rio Grande (Figura 1) está situado ao Sul do estado do Rio Grande do Sul (RS), e é caracterizado por um estreito pontal arenoso no estuário da Lagoa dos Patos, escoadouro de um sistema hidrográfico que drena mais da metade do volume de bacias hidrográficas do estado do RS (FERREIRA & ROBAINA, 2012). A localidade possui uma grande importância econômica para o estado do RS, com destaque para o complexo portuário, o qual é considerado o maior do Sul do Brasil, e uma relevância estratégica para o desenvolvimento do comércio internacional.

Segundo o censo demográfico 2022, do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, o município do Rio Grande possui uma população estimada de 191.900 habitantes (IBGE, 2023), e representa o 5º maior Produto Interno Bruto (PIB) do estado do RS. O clima da região apresenta uma grande amplitude térmica, sendo caracterizado como subtropical – temperado, com forte influência oceânica, invernos relativamente frios e verões tépidos. A temperatura máxima, média e mínima diária na região é, respectivamente, 22.6 °C, 18.3 °C e 14.9 °C (REBOITA & KRUSCHE, 2018).

METODOLOGIA

Para composição do banco de dados digital, foram obtidos arquivos vetoriais da base cartográfica do município do Rio Grande (i.e. divisão municipal, setores censitários, entre outros). Os dados foram adquiridos junto ao repositório eletrônico do IBGE (www.ibge.gov.br). Para composição do banco de dados de imagens, foram selecionadas cenas dos sensores da série de satélites *Landsat 8*, imagens dos sensores OLI e TIRS, para o período de janeiro/2013 a dezembro/2023. A diferença temporal entre intervalos de imagens se deu pela presença de nuvens em muitas



Figura 1. Mapa de localização da área de estudo. Fonte: Os autores.

cenos. Para este estudo, foram utilizadas cenas do período do verão, que apresentassem 0% na cobertura de nuvens para a região, de forma a proporcionar uma análise qualitativa, a partir dos índices físicos propostos. No total, foram utilizadas 10 imagens. As cenas adquiridas possuem resolução espacial de 30 metros e radiométrica de 8 a 12 bits. As imagens foram obtidas junto ao repositório eletrônico do *U.S. Geological Survey* (USGS) (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), fornecidas em nível de processamento L1-A, contendo valores dos *pixels* em contadores digitais.

De posse da base de dados vetorial e do banco de imagens selecionado, foram seguidos os passos metodológicos presentes no fluxograma da Figura 2, a partir das seguintes etapas: (1) Pré-processamento, Adequação de Coordenadas e Recorte das Cenas Orbitais; (2) Aritmética de Bandas para Cálculo do NDBI, NDVI e Temperatura de Superfície de cada Cena de Recorte; (3) Classificação das Áreas de Ilhas de Calor; e (4) Correlação Espacial entre a Presença de Ilhas de Calor, Manchas Urbanas e Densidade Vegetal. Em paralelo, foi realizada a composição do Banco de Dados Meteorológicos e a Aplicação do Teste de Tendência Estatística.

O pré-processamento do banco de dados de imagem foi feito no *software Quantum GIS* (QGIS) versão 3.28.6, e consistiu em três etapas: (1) Correção radiométrica, convertendo os valores de contadores digitais para radiância espectral no topo da atmosfera; (2) Correção atmosférica, convertendo os valores de radiância espectral para

valores de reflectância no topo da atmosfera e, por último, valores de reflectância na superfície (CONGEDO, 2021), sendo que, para esse processo, foi utilizado o *plugin SCP* (*Semi-Automatic Classification Plugin*); e (3) Recorte e adequação do sistema de coordenadas, para a projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), a qual foi referenciada no *datum* SIRGAS 2000, Zona 22S. Esse tipo de tratamento preliminar, segundo OLIVEIRA et al. (2021), possibilita a correção das degradações radiométricas, provenientes de desajustes na calibração dos sensores, erros na transmissão de dados, influências atmosféricas e distorções geométricas.

As cenas adquiridas foram corrigidas para a reflectância de superfície, conforme os parâmetros estabelecidos pelo fornecedor das imagens, disponibilizados no site (<https://landsat.usgs.gov/using-usgs-landsat-8-product>), e nos metadados de cada cena (presentes no arquivo auxiliar de sufixo “.MTL”). Sequencialmente, foi empregada a união de bandas espectrais de cada uma das imagens, utilizando também o *plugin SCP*, e a reprojeção espacial dessas para compatibilidade com a base cartográfica adotada. Para o banco de dados de imagens, não foi necessário realizar a correção geométrica, tendo em vista que as imagens já se encontravam georeferenciadas. Após o pré-processamento do banco de dados de imagens, foi realizado o recorte das cenas de interesse, a partir do arquivo *shapefile* do Rio Grande.

O Índice de Detecção de Ocupação Urbana do Solo (NDBI) é um índice que calcula as áreas

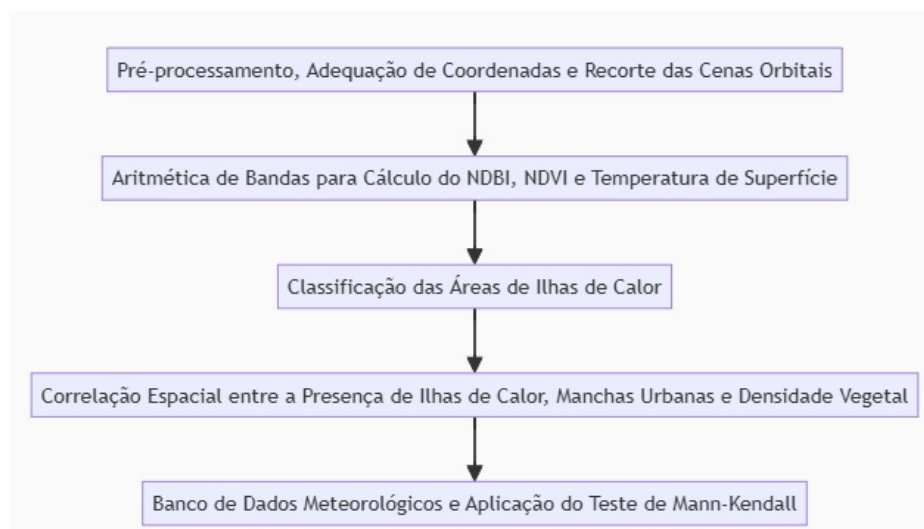


Figura 2. Fluxograma metodológico. Fonte: Os autores..

construídas, de forma normalizada (Equação 1). O NDBI combina faixas do infravermelho médio (Banda 6 do sensor OLI/Landsat 8) e infravermelho próximo (Banda 5 do sensor OLI/Landsat 8), para auxiliar na classificação de uso e ocupação da superfície no ambiente urbano. Os valores de NDBI variaram de -1 a +1, sendo que os valores positivos correspondem às áreas edificadas.

$$NDBI = \frac{B_6 - B_5}{B_6 + B_5} \quad \text{(Equação 1)}$$

No processo de classificação, XU (2008) destaca que é possível que o NDBI se misture com ruídos nas imagens de outras classes de uso, como solo exposto, pois os valores de reflectância são próximos aos valores das áreas urbanas. De forma a corrigir esses ruídos, foi calculado o índice *Built-Up* (BU) (Equação 2), o qual considera a relação entre o NDVI e o NDBI.

$$BU = NDBI - NDVI \quad \text{(Equação 2)}$$

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) é a combinação matemática dos níveis de reflectância para bandas coletadas a partir de um sensor, que tem como alvo o estudo da vegetação. O NDVI foi obtido a partir dos valores de reflectância das faixas espectrais do vermelho e do infravermelho próximo (Equação 3), e foi aplicado para a série de dados de 2013 a 2023.

$$NDVI = \frac{B_5 - B_4}{B_5 + B_4} \quad \text{(Equação 3)}$$

onde B5 representa a banda do infravermelho, NIR representa a banda do infravermelho próximo, e B4 representa a banda espectral do vermelho, no sensor OLI/ Landsat 8.

A aritmética de bandas foi processada no *software* QGIS, onde os valores de NDVI variaram de -1 a +1. Valores próximos de +1 correspondem as maiores densidades de biomassa. O comportamento das bandas espectrais para o índice NDVI é descrito na Tabela 1.

A Temperatura de Superfície (Ts) é determinada a partir da utilização da radiância espectral da banda termal e da emissividade da superfície (εs), que é a razão da energia emitida pela superfície de uma determinada matéria com a energia emitida pelo corpo negro na mesma temperatura (JENSEN, 2011), sendo dada pela Equação 4.

$$T_s = \frac{K_2}{\ln(\epsilon_s \cdot K_1 + 1)} / L \quad \text{(Equação 4)}$$

onde K1 e K2 são constantes de calibração da banda termal, presentes nos metadados da cena.

Para a identificação automática das áreas de ilhas de calor em cada cena tratada, foi empregada a classificação por limiar de temperatura de superfície. A técnica consiste na classificação das áreas de ilhas de calor (Equação 5) como aquelas que possuem temperatura acima da média acrescida do desvio-padrão da temperatura de superfície, considerando as áreas de ilhas de calor como anomalias térmicas. Assim:

$$\text{Ilha de calor: } T_s \geq T + \text{STD} \quad \text{(Equação 5)}$$

Com isso, foram geradas imagens de classificação automática das áreas consideradas como ilhas de calor, correspondendo à presença de ilhas de calor em cada uma das cenas analisadas. Essas ilhas de calor correspondem ao filtro de áreas que apresentaram valores de temperatura da superfície além do limiar do valor médio, acrescido

Tabela 1. Comportamento das bandas espectrais para o índice NDVI, com base nas bandas do sensor OLI/Landsat 8.

Tipo de alvo	Comportamento espectral
Alvo vegetal	$B_4 < B_5 \Rightarrow 0 < NDVI \leq 1$
Alvo não vegetal	$B_4 \geq B_5 \Rightarrow -1 \leq NDVI \leq 0$

do desvio padrão, o que indicam áreas de anomalia térmica positiva.

Para determinação da correlação espacial entre a presença de ilhas de calor, a densidade vegetal e a presença das manchas urbanas, foi empregada a técnica de *Overlay*. Essa técnica se constitui em fazer a análise da intersecção espacial entre distintos temas de interesse para cada data de relevância, como por exemplo, a intersecção espacial entre a classe de ilhas de calor e a densidade vegetal.

Com isso, foram determinadas as relações espaciais entre a presença de ilhas de calor com as classes de uso e a cobertura do solo local, o que possibilitou um melhor entendimento dessa dinâmica. A partir de dados meteorológicos, da caracterização da evolução da mancha urbana na cidade do Rio Grande e da distribuição da cobertura vegetal, foi possível mapear as regiões em que ocorreu formação de ilhas de calor, identificando a correlação espacial entre estas e o uso e a cobertura do solo.

O banco de dados meteorológicos foi criado a partir de informações provenientes da base de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) (www.portal.inmet.gov.br). Foram utilizados dados de direção e intensidade dos ventos, temperatura e radiação, para os períodos de 2013 a 2023, coletados da estação automática do Rio Grande (Código A802).

Em termos estatísticos, foi realizada uma análise não paramétrica, a partir do teste estatístico de Mann-Kendall (MANN, 1945; KENDALL, 1975), para caracterização da tendência da série de

dados de vento e temperatura. Para considerar a estabilidade da série temporal, esse teste considera a sucessão de valores que ocorrem de forma independente, e a distribuição da probabilidade dos dados permanecerem sempre na mesma da série. O teste de Mann-Kendall realiza um comparativo entre o número de vezes que os termos da série de dados são maiores que o valor analisado. A partir de um comparativo entre cada dado com os valores restantes, foi possível determinar a estabilidade da série.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em relação aos dados meteorológicos, foi observado que a velocidade média do vento para o período de 2013 a 2023 foi de 3,46 m/s, e as direções predominantes do vento foram de N, NE e E. Em termos estatísticos, o teste de Mann-Kendall mostrou uma tendência linear de redução da velocidade do vento de -0,09 m/s por ano (Figura 3), sugerindo uma diminuição gradual da intensidade dos ventos na região. O coeficiente de determinação médio quadrático (R^2) para a testagem foi de 93,5%, o que é considerado com uma boa acurácia e explica grande parte da variabilidade observada nos dados.

Apesar de oscilações significativas ao longo dos anos, com períodos de maior e menor intensidade, a tendência geral da série de dados de vento apontou para uma suavização dessas oscilações ao longo do tempo. A diminuição da velocidade do vento pode impactar, por exemplo, diversos aspectos relacionados ao conforto térmico na cidade do Rio Grande, especialmente

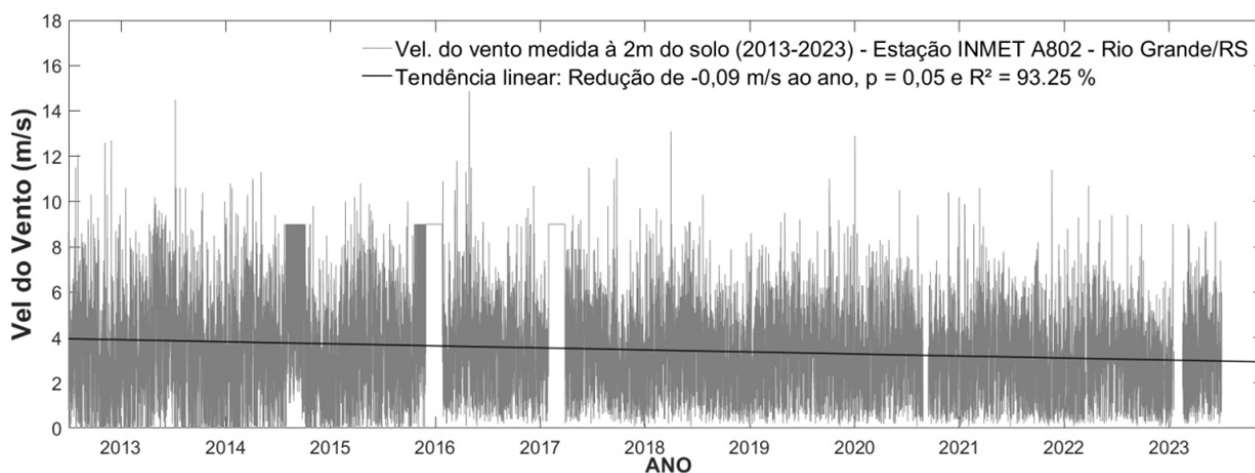


Figura 3. Comportamento da série de dados de velocidade dos ventos, período 2013 a 2023, com base no teste estatístico de Mann-Kendall. Fonte: Os autores.

considerando sua localização em uma região costeira.

A redução na ventilação natural pode resultar em uma maior sensação térmica de calor por parte da população, afetando a qualidade de vida e podendo influenciar na dissipação de poluentes atmosféricos, provenientes das indústrias de fertilizantes estabelecidas na região. A tendência de queda na velocidade dos ventos pode estar relacionada à mudança no padrão de circulação atmosférica, às variações na intensidade e à frequência dos sistemas meteorológicos atuantes na região e às alterações no uso e na cobertura do solo. Apesar de se ter um conhecimento prévio sobre os impactos na redução da circulação de ventilação natural, OLIVEIRA & BORROZZINO (2018) destaca que são poucos os estudos que focam nas alterações da velocidade do vento no Hemisfério Sul. No caso da região Sul do Brasil, o estudo conduzido por CARDOSO et al. (2016) tem demonstrado um decréscimo na velocidade média do vento sobre o Oceano Atlântico.

Em relação à umidade relativa do ar mensal, os valores variaram entre 100% e 9%, para o período de 2013 a 2023, com média de 72,7% e desvio padrão de $\pm 14,1\%$. O resultado do teste de Mann-Kendall mostrou uma tendência linear de aumento da umidade relativa do ar de $+0,63\%$ ao ano (Figura 4), sugerindo uma elevação gradual dos níveis de umidade na região. O coeficiente de determinação médio quadrático (R^2) para a testagem foi de 96,83%, o que é considerado com

uma boa acurácia.

Para os dados de variação da cobertura vegetal, os resultados obtidos mostraram que a cena *Landsat 8* para a imagem de 2013 apresentou uma variação mínima e máxima dos intervalos de NDVI de $-0,05$ e $0,41$, respectivamente (Figura 5A). Para 2023, os valores de mínimos e máximos de NDVI foram de $-0,39$ e $0,87$, respectivamente (Figura 5B). Em termos quantitativos, a área de vegetação calculada para 2013 foi de 533,64 ha, e em 2023 foi de 218,45 ha, uma redução de 40,94% em 10 anos.

Para os dados de variação das áreas construídas, os valores de NDBI mínimo e máximo para a imagem de 2013 variaram entre $-0,39$ e $0,87$, respectivamente (Figura 6A). Para 2023, os intervalos mínimo e máximo de NDBI foram de $-0,67$ a $0,31$ (Figura 6B), respectivamente. As áreas que apresentaram maiores mudanças são a região da entrada do balneário Cassino e a Sudoeste da cidade do Rio Grande. As áreas rurais e os setores que estão às margens da rodovia também se destacam por um aumento no número de construções.

Rio Grande tem se consolidado como um polo regional, devido à sua economia diversificada, que inclui atividades portuárias, industriais e universitárias. Nesse contexto, destaca-se o Polo Naval e *Offshore*, que foi inaugurado em 2010 e teve seu ápice em 2014. D'AVILA (2018) destaca que o grande fluxo migratório no período, por conta da atração de mão de obra gerada pelo Polo Naval, acarretou nessa maior demanda por novas

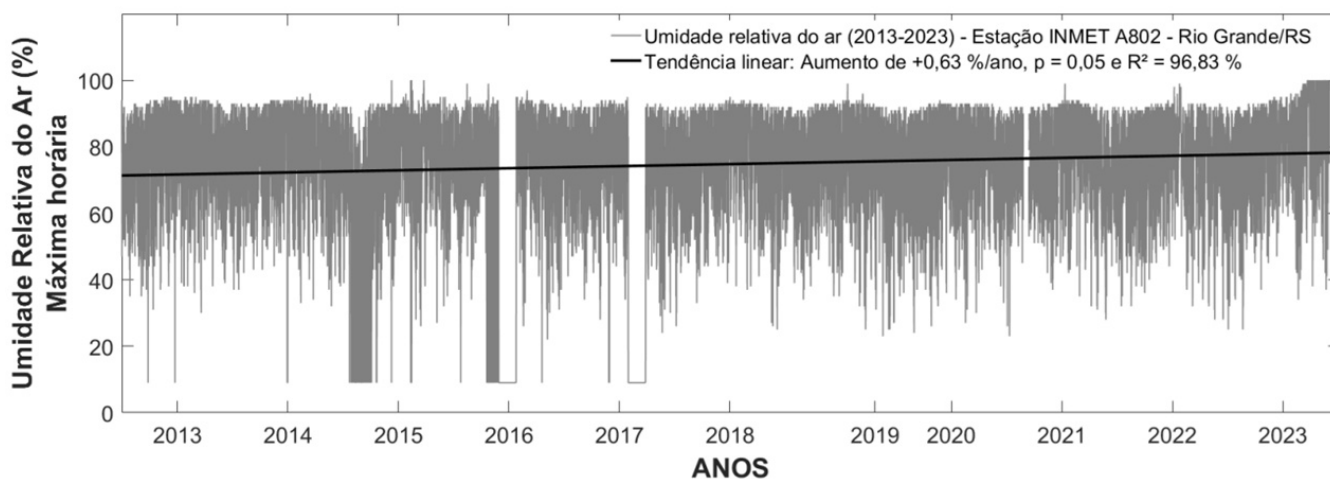


Figura 4. Comportamento da série de dados de umidade relativa do ar, período 2013 a 2023, com base no teste estatístico de Mann-Kendall. Fonte: Os autores.

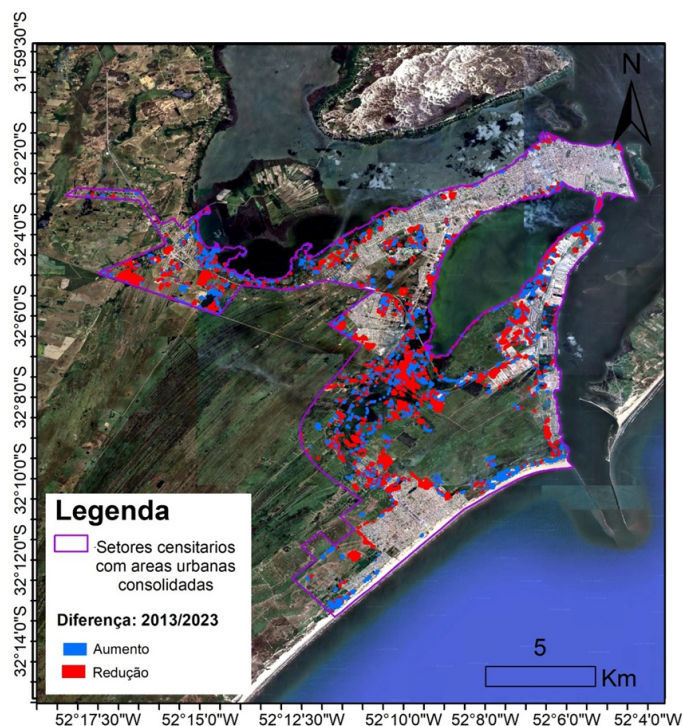


Figura 5. Caracterização do crescimento e redução de áreas de vegetação no município do Rio Grande, RS, entre os anos de 2013 e 2023. Fonte: Os autores.



Figura 6. A- Caracterização do crescimento e redução de áreas urbanizadas no município do Rio Grande, RS, entre os anos de 2013 e 2023. Fonte: Os autores.

áreas urbanizadas, levando à expansão territorial entre os anos 2013 e 2015.

No balneário Cassino, foi observado um crescimento significativo nas adjacências e nas

áreas mais interiores. A região do distrito industrial também apresentou uma expansão acentuada, o que pode ser um indicativo de possíveis investimentos em infraestrutura e atividades econômicas associadas. No caso do bairro Barra, o aumento de áreas urbanizadas pode estar associado a eventuais ocupações de terrenos ilegais. Por fim, a zona central do município apresentou um crescimento disperso, sendo observados alguns adensamentos urbanos e novas ocupações no entorno da Lagoa dos Patos e em bairros mais afastados do centro histórico.

Em relação à evolução das localidades que apresentam ilhas de calor urbano, a análise das imagens *Landsat*, referentes aos anos de 2013, 2016, 2020 e 2023, mostram que as menores temperaturas são registradas nas localidades que apresentam áreas de vegetação densa, e nas proximidades dos corpos d'água. Ao longo da série de dados de imagens, é observada uma tendência no aumento das ilhas de calor na cidade do Rio Grande. Em 2013, as áreas de calor estavam concentradas, principalmente, no centro urbano e nas áreas industriais, refletindo um padrão típico de ilhas de calor (Figura 7A). No entanto, em 2016, observou-se um aumento na intensidade e na extensão dessas ilhas de calor, com uma expansão para áreas periféricas do município (Figura 7B). Em 2020, o crescimento das áreas de ilhas de calor se intensificou. Também, foi evidenciado um aumento da temperatura nessas localidades, quando comparado a períodos anteriores (Figura 7C). Em 2023, a tendência de aumento se manteve tanto na temperatura de superfície quanto nas áreas afetadas, indicando um agravamento da situação (Figura 7D).

O crescimento urbano se mostrou um fator determinante na formação dessas ilhas, o que foi acentuado com a fragmentação de áreas com presença de vegetação e de corpos d'água. Esse fenômeno pode ser atribuído ao crescimento urbano, à expansão do distrito industrial e à possível redução das áreas verdes.

A crescente intensificação das ilhas de calor urbanas entre 2013 e 2023, na cidade do Rio Grande, levanta preocupações significativas em relação ao conforto térmico da população. Segundo SANTAMOURIS (2014), as ilhas de calor urbanas

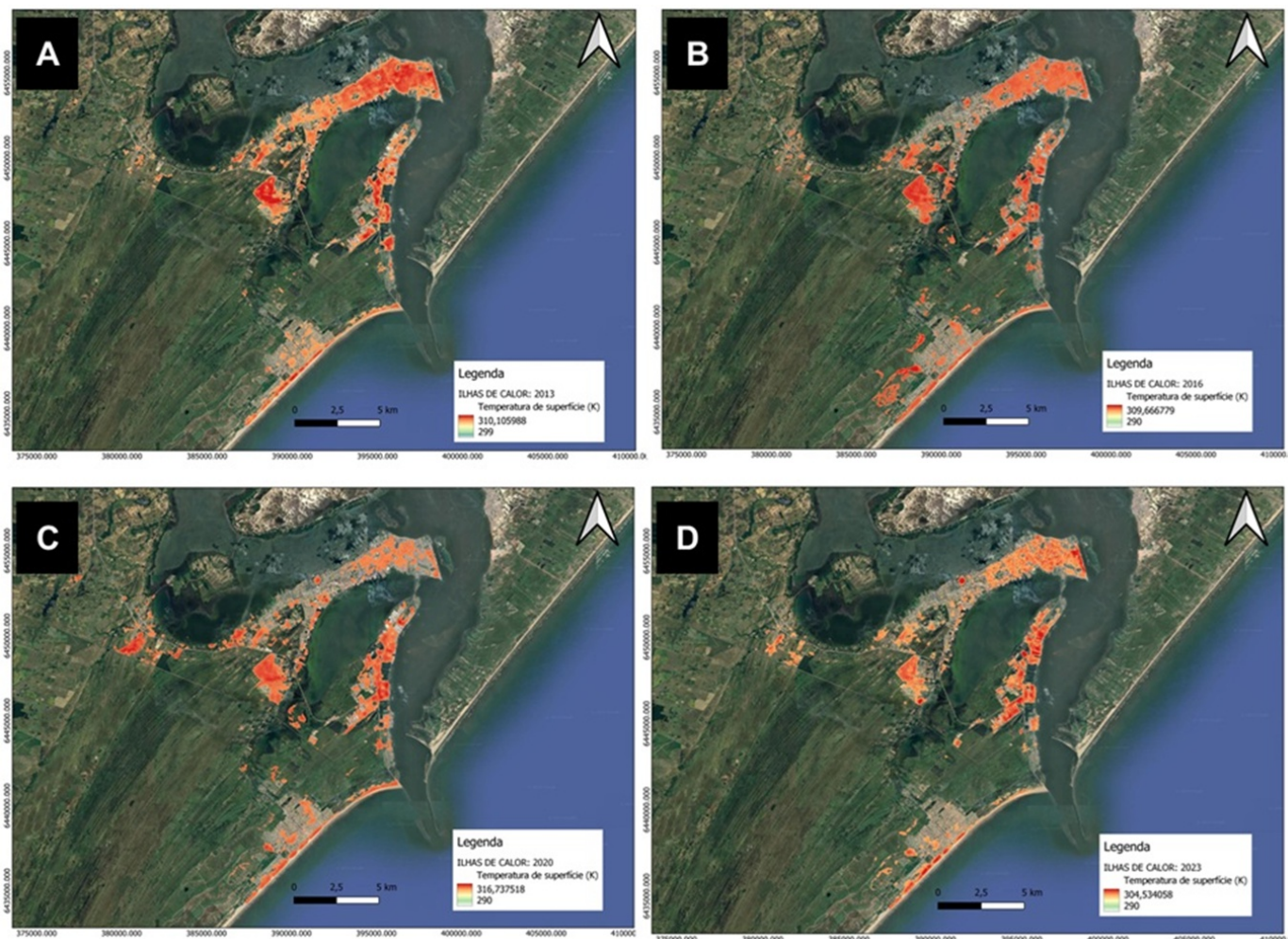


Figura 7. Evolução das áreas de ilhas de calor na cidade do Rio Grande, RS, nos períodos de: A- 2013; B- 2016; C- 2020; e D- 2023. Fonte: Os autores.

podem elevar a temperatura em até 5 °C em comparação às áreas rurais, resultando em desconforto térmico e riscos à saúde de idosos e crianças, os quais são considerados grupos sociais mais vulneráveis. A fragmentação das áreas verdes, observada principalmente entre nas imagens de 2020 e 2023, reduz a capacidade do ambiente urbano de moderar as temperaturas. Essa redução, segundo BOWLER et al. (2010), tem como consequência uma intensificação dos efeitos das ilhas de calor, com reflexos no bem-estar da população.

O crescimento urbano não planejado, caracterizado pela expansão não controlada, a qual está normalmente associada à degradação do solo e a redução da cobertura vegetal, tende a aumentar a absorção de calor e a reduzir a ventilação natural, contribuindo para o aumento das temperaturas superficiais. Outros fatores, como a configuração urbana da cidade e o uso do solo, segundo OKE

(1982), são determinantes para a formação de ilhas de calor.

CONCLUSÕES

O monitoramento das interações entre os padrões dos ventos, de umidade e o comportamento da temperatura ao longo dos anos, na cidade do Rio Grande, foi fundamental para compreender os impactos dessas variáveis na formação das ilhas de calor urbano. Em termos meteorológicos, o período de 2013 a 2023 apontou uma velocidade média do vento de 3,46 m/s, com direções predominantes de N, NE e E. O teste estatístico de Mann-Kendall revelou uma tendência linear de redução da velocidade do vento, com declínio anual de -0,09 m/s (acurácia de 93,5%), sugerindo uma diminuição gradual da ventilação natural na cidade. Tal cenário pode impactar negativamente o conforto térmico na cidade. Simultaneamente, a umidade relativa do ar variou entre 100% e 9%,

com média de 72,7% e desvio padrão de $\pm 14,1\%$, apresentando uma tendência de aumento de +0,63% ao ano, com alta confiabilidade estatística ($R^2 = 96,83\%$).

A rápida urbanização da cidade, impulsionada por fatores econômicos, como o crescimento do Polo Naval e *Offshore*, resultou em alterações significativas no uso e na cobertura do solo, especialmente com a substituição de áreas vegetadas por superfícies impermeáveis. A análise multitemporal de imagens *Landsat* mostrou uma redução acentuada na cobertura vegetal (de 533,64 ha em 2013 para 218,45 ha em 2023) e um aumento nas áreas construídas, sobretudo no balneário Cassino, no distrito industrial e nas margens de rodovias. Esse processo de urbanização não planejada tem se mostrado um fator determinante para a intensificação das ilhas de calor urbano.

As imagens de 2013, 2016, 2020 e 2023 evidenciam uma tendência clara de aumento da intensidade e da extensão dessas ilhas, que inicialmente se concentravam nas áreas centrais e industriais, mas que, com o tempo, expandiram-se para regiões periféricas e anteriormente vegetadas. A fragmentação das áreas verdes e a proximidade reduzida de corpos d'água têm diminuindo a capacidade de resfriamento natural do ambiente urbano, agravando os efeitos térmicos.

O avanço das tecnologias de sensoriamento remoto tem desempenhado papel essencial na observação e na análise de parâmetros relacionados ao conforto térmico urbano. O mapeamento das áreas críticas possibilitou a identificação das localidades mais vulneráveis ao fenômeno das ilhas de calor na cidade do Rio Grande. Os dados obtidos reforçam a necessidade de se investir em políticas públicas, tais como a criação de áreas verdes para auxiliarem na regulação natural da temperatura; melhorias no sistema de transporte público, a partir de investimentos em modais mais eficientes e menos poluentes; e um planejamento urbano integrado com foco na revisão e atualização do plano diretor da cidade, de forma a incluir diretrizes que considerem o clima urbano. Por fim, ações que integrem as dinâmicas climáticas, ambientais e sociais da cidade, podem gerar resultados significativos na melhoria das condições

de conforto térmico da cidade do Rio Grande.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BOWLER, D. E.; BUYUNG-ALI, L.; KNIGHT, T. M. & PULLIN, A. S. 2010. Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, 97(3): 147-155. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.05.006>.
- CARDOSO, L. F. N.; SILVA, W. L. & SILVA, M. G. A. 2016. Long-term trends in near-surface wind speed over the Southern hemisphere: a preliminary analysis. *International Journal of Geosciences*, 7 (7): 938-943. <https://doi.org/10.4236/ijg.2016.77070>.
- CONGEDO, L. 2021. Semi-automatic classification plugin: a python tool for the download and processing of remote sensing images in QGIS. *Journal of Open Source Software*, 6(64): 3172. <https://doi.org/10.21105/joss.03172>.
- D'AVILA, A. P. F. 2018. Sob o signo do desenvolvimento: Apogeu e crise do Polo Naval e offshore de Rio Grande e suas implicações para o trabalho. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil 254 p.
- DRITSAS, S. E. 2020. The effect of sea level rise on coastal populations: The case of the Gironde (Estuaries of Gironde). *Economic Analysis and Policy*, 66: 41-50. <https://doi.org/10.1016/j.eap.2020.02.008>.
- FERREIRA, J. & ROBAINA, L. 2012. Expansão urbana e o perigo de desastres por inundação em Rio Grande/RS. *Geografia*, 37(03): 445-462.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). 2023. Sinopse do Censo Demográfico 2022. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. (Disponível em: <https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/>).
- JENSEN, J. R. 2011. Sensoriamento Remoto do Ambiente. XXp., Parêntese Editora, São Paulo, Brasil. (ISBN: 978-85-605-0706-1).
- LEAL, L. 2012. A influência da vegetação no clima urbano da cidade de Curitiba – PR. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil. 172p.
- KENDALL, M.G. 1975. Rank correlation methods. 120p., Charles Griffin, London, UK. (ISBN: 978-

- 01-952-0837-5).
- KLEIN, A. H. F. & SHORT, A. D. 2019. Brazilian Beach Systems: Introduction. In: SHORT, A. D. & KLEIN, A. H. F. (Eds.). *Brazilian Beach Systems*, pp. 1-36, Springer, Florida, USA. (ISBN: 978-33-198-0798-0).
- MANN, H.B. 1945. Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13: 245-259. <https://doi.org/10.2307/1907187>.
- NOBREGA, R. S. & LEMOS, T. V. S. 2011. O microclima e o (des)conforto térmico em ambientes abertos na cidade do Recife. *Revista de Geografia da UFPE*, 28(01): 93-109.
- OKE, T. R. 1995. The heat island of the urban boundary layer: characteristics, causes and effects. In: CERMAK, J. E.; DAVENPORT, A. G.; PLATE, E. J. & VIEGAS, D. X. (Eds.). *Wind Climate in Cities*, pp. 81-107, Springer, Dordrecht, Netherlands. (ISBN: 978-94-017-3686-2)
- OKE, T. R. 1982. The Energetic Basis of the Urban Heat Island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455): 1-24. <https://doi.org/10.1002/qj.49710845502>.
- OLIVEIRA, D. & BORROZZINO, E. 2018. Tendências de alteração da velocidade do vento no estado do Paraná. *Agrometeoros*, 26(01): 145-149.
- OLIVEIRA, J. L. M.; CERQUEIRA NETO, S. P. G. & DA SILVA, J. B. L. 2021. Evaluating of changes in soil use in the city of Eunápolis-BA through analysis of the efficiency of spectral indices of NDVI, NDBI and Built-UP. *Brazilian Journal of Development*, 7(9): 87529-87544. <https://doi.org/10.34117/bjdv7n9-084>.
- REBOITA, M. S. & KRUSCHE, N. 2018. Normais climatológicas provisórias de 1991 a 2010 para Rio Grande, RS. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 33: 165-179. <https://doi.org/10.1590/0102-7786331010>.
- SANTAMOURIS, M. 2014. Heat Island Research in the Context of Climate Change. *Journal of Building Performance*, 5(1): 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.022>.
- SCHERER, M. 2013. Gestão de praias no Brasil: subsídios para uma reflexão. *Revista de Gestão Costeira Integrada*, 13(01): 3-13. <https://doi.org/10.5894/rgci358>.
- SOLEYMANPOUR, R.; PARSAEE, N. & BANAEI, M. 2015. Climate Comfort Comparison of Vernacular and Contemporary Houses of Iran. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 201: 49-61. <http://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.08.118>.
- UNITED NATIONS (UN). 2022. *World Cities Report 2022: Envisaging the Future Cities*. 422p., United Nations Human Settlements Programme, Nairobi, Kenya. (Acessado em: <https://unhabitat.org/wcr/>).
- XU, H. 2008. A new index for delineating built-up land features in satellite imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 29(14): 4269-4276. <https://doi.org/10.1080/01431160802039957>.