

ILHA DE CALOR DE SUPERFÍCIE E VULNERABILIDADE SOCIAL EM MANAUS – AM

Thiago Oliveira dos Santos¹
Larissa Kristyne Campos dos Santos²
Beatriz da Silva Lima³
Luciomar da Silva Almeida Filho⁴
Valdir Soares de Andrade Filho⁵
Natacha Cíntia Regina Aleixo⁶

INTRODUÇÃO

A expansão da malha urbana tem alterado substancialmente o uso e a cobertura do solo, o que resulta em impactos negativos no ambiente. A substituição da paisagem natural pela área urbana com excesso de pavimentação, alta densidade populacional e edificações contribui para formação de ilhas de calor urbanas (ICUs). Segundo Oke (1988), as ICUs são um fenômeno caracterizado pelo aumento da temperatura do ar nas áreas centrais das cidades em comparação com as regiões rurais.

Neste contexto, a compreensão das condições sociais das populações e dos lugares devem ser incorporada nos estudos das manifestações climáticas-urbanas, pois influenciam na capacidade de resposta e recuperação, podendo aumentar ou diminuir a magnitude dos riscos ambientais. As Zonas Leste e Norte da capital Manaus se destacam em relação às demais no que diz respeito ao número de habitantes. O bairro Jorge Teixeira, localizado na Zona Leste de Manaus, é o mais populoso da capital, com 133 mil pessoas, superando a população total de qualquer um dos 61 municípios amazonenses do interior do estado (IBGE, 2022). O uso e ocupação do solo, o elevado número de habitantes, a alta densidade demográfica e o grande número de moradias precárias fazem da Zona Leste uma área de estudo única quando se fala em ilhas de calor e vulnerabilidade social, já que essa região apresenta fatores que podem acentuar o nível de vulnerabilidade.

Sendo assim, o objetivo principal do estudo foi analisar a ocorrência da ilha de calor de superfície integrada à vulnerabilidade social da população da Zona Leste da cidade de Manaus,

¹ Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Amazonas – UFAM, t.santos.720@gmail.com

² Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Amazonas – UFAM, lskristyne@gmail.com

³ Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Amazonas – UFAM, limab017@gmail.com

⁴ Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Amazonas – UFAM, Luciomar.almeida13@gmail.com

⁵ Docente na Universidade do Estado do Amazonas no departamento de Geografia – UEA, vfilho@uea.edu.br

⁶ Docente na Universidade Federal do Amazonas no departamento de Geografia e Programa de Pós-Graduação em Geografia – UFAM, natachaaleixo@ufam.edu.br

Amazonas. Diante deste cenário, espera-se que a presente pesquisa possa subsidiar a formulação de políticas públicas que buscam estratégias de adaptação e mitigação da população mais vulnerável aos efeitos das ICUs em cidades de diferentes portes.

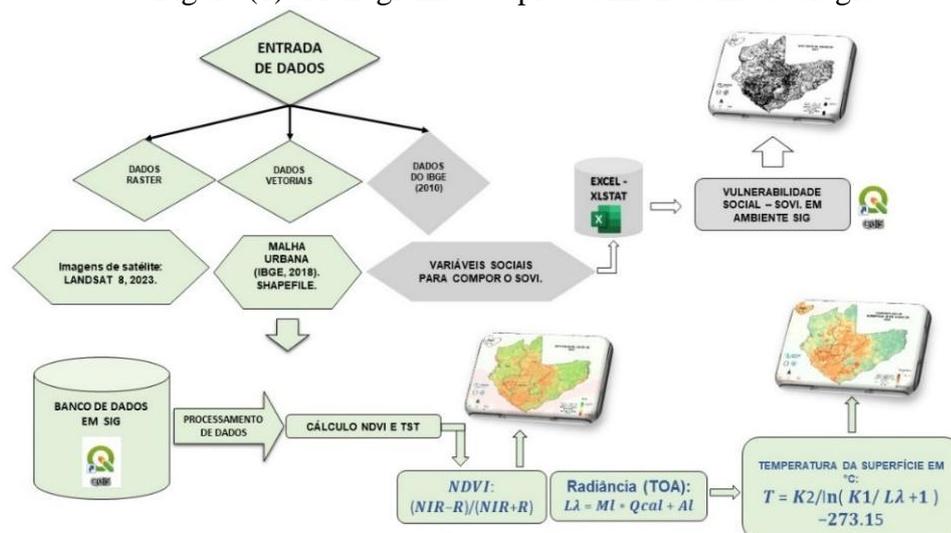
MATERIAIS E MÉTODOS

Para elaboração dos mapas de temperatura da superfície e NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada/*Normalized Difference Vegetation Index*), foram utilizadas imagens do satélite Landsat 8 (sensor OLI - *Operational Land Imager* e TIRS - *Thermal Infrared Sensor*) com data de passagem em 29 de junho de 2023, órbita 231, ponto 062, disponibilizadas gratuitamente pelo *United Geological Survey* (USGS). Os procedimentos para a obtenção de temperatura da superfície, NDVI, mapa de intensidade e ilha de calor normalizada foram realizados no *software* QGIS 3.26 utilizando a calculadora raster.

No processamento da banda 10 empregaram-se parâmetros fixos de conversão de redimensionamento de níveis digitais (*ND*) para topo da atmosfera (*TOA*) depois convertidos em temperatura de brilho dos alvos em Kelvin e em seguida em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$)/($Bt - \text{Brightness Temperature} - K$) a partir das equações disponibilizadas pelo USGS (2018).

O NDVI foi empregado para análise da vegetação nas cenas, calculado com uso das bandas 4 e 5, o índice envolve a razão normalizada entre a diferença e a soma das bandas do infravermelho próximo (*NIR*) e do vermelho (*RED*) (Rouse et al. 1973), conforme se observa na Figura 1.

Figura (1): Fluxograma dos procedimentos metodológicos



Elaborado pela proponente. 2024

Fonte: elaborado pela autoria (2024).

O NDVI tem a capacidade de identificar a presença de vegetação e caracterizar sua distribuição espacial, como também se estende para realização de análises temporais, sendo possível realizar o monitoramento das mudanças na vegetação. Em suma, valores próximos de

+1 indicam alta densidade de clorofila e, conseqüentemente, uma vegetação fotossinteticamente ativa. Por outro lado, valores próximos de -1 sugerem áreas com baixa cobertura vegetal, além disso, podem representar corpos d'água ou nuvens (Freitas et. al. 2017).

A identificação da ilha de calor de superfície foi realizada com base na diferença entre a temperatura dos alvos na área construída em relação a uma superfície vegetada. Dessa forma, o mapa de intensidade da ICU de superfície foi elaborado a partir da proposta de classificação de García (1995) que agrupa as intensidades expressas pelas magnitudes fracas (0 °C a 2 °C), médias (moderadas - 2 °C a 4 °C), fortes (4 °C a 6 °C) ou muito fortes (Maior que 6 °C). Quando a diferença entre alvos do construído e do vegetado são menores que zero, há, portanto, a configuração de ilha de frescor (Amorim, 2000).

Dada a diversidade de metodologias usadas para a elaboração de índices de vulnerabilidade social, optou-se pela proposta da Cutter et al. (2003) que se refere ao SoVI® (Índice de Vulnerabilidade Social/*Social Vulnerability Index*). O mapa do SoVI® foi elaborado a partir do recorte espacial dos setores censitários urbanos da zona leste da cidade de Manaus, com base nas informações obtidas no Censo Demográfico de 2010: Resultados do Universo por setor censitário (IBGE, 2010). Foram coletadas 129 variáveis que informam as características demográficas, habitacionais e do entorno.

Após a coleta, foi feito o tratamento dos dados, que consiste em sua padronização e conversão em valores percentuais. Em seguida, foram empregados dois métodos estatísticos para simplificar o conjunto de variáveis: 1) o teste de Multicolinearidade foi aplicado para identificar variáveis com correlações estatisticamente significativas ($r^2 > 0,09$), o que resultou em um grupo reduzido de 90 variáveis; 2) a Análise dos Componentes Principais foi usada para examinar esse grupo de 90 variáveis, consideraram-se apenas os componentes que tivera uma contribuição percentual de autovalor acumulado até 50% da variância total da matriz. Além disso, apenas as cargas fatoriais entre 0,5 e -0,5 foram adotadas (Cutter et al. 2003). Por fim, os valores foram classificados através do desvio padrão (positivos e negativos).

As medidas estatísticas foram executadas pelo pacote de análise de dados, o *XLStat*®, juntamente com o *Microsoft Office Excel*®. A produção cartográfica foi realizada utilizando o *software* QGIS versão 3.16.

REFERENCIAL TEÓRICO

A presença de áreas urbanas induz alterações na atmosfera, incluindo efeitos decorrentes da rugosidade (Grimmond et al. 1998), como a geração de turbulência (Roth, 2000), intensificação de tempestades (Bornstein e Lin, 2000), mudanças na hidrologia (Grimmond e Oke, 1986).

Devido à crescente preocupação com o aumento da população urbana no mundo, o estudo do clima das cidades tem ganhado importância. No entanto, foi somente na década de 1970 que surgiram publicações sobre o clima urbano em latitudes tropicais. Os estudos em regiões de clima equatorial ainda são reduzidos, porém, esse cenário passa por uma mudança positiva (Jauregui, 1993; Monteiro, 1984).

Nas áreas urbanas, os sistemas naturais enfrentam significativas alterações devido à atividade humana, especialmente devido aos elementos que compõem a estrutura urbana. Isso inclui a remoção da vegetação, a impermeabilização do solo com asfalto e concreto, que impedem a absorção da água da chuva. Essas mudanças modificam o fluxo superficial da água e taxa de evaporação do sol, resultando na diminuição da umidade relativa do ar. Os climas em áreas urbanas extensas e densamente construídas diferem significativamente dos espaços abertos circundantes.

No contexto brasileiro, o conceito de ilha calor consiste em bolsões de ar quente encontrados em ambiente urbanos, devido às diferenças nas composições dos materiais construtivos, que possuem a capacidade de alterar o balanço energético da superfície, advindo da energia solar e da produção do calor originado pelas atividades humanas (Amorim, 2017).

A área urbana de Manaus tem sido frequentemente estudada em relação ao clima urbano, com destaque para a análise das ilhas de calor (Aguiar, 1995; Silva e Aguiar, 2012). Os resultados indicam que fatores como a ausência de vegetação, a alta capacidade de difusão térmica dos materiais urbanos, a baixa refletância solar desses materiais e a geometria que retém o calor são impactos antrópicos que contribuem para a modificação da atmosfera urbana e, conseqüentemente, de seu clima. No entanto, o número de estudos voltados para a análise do clima urbano e vulnerabilidade, ainda é considerado baixo, e importantes lacunas precisam ser preenchidas com pesquisas focadas em diferentes escalas e análise dentro desse tema.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

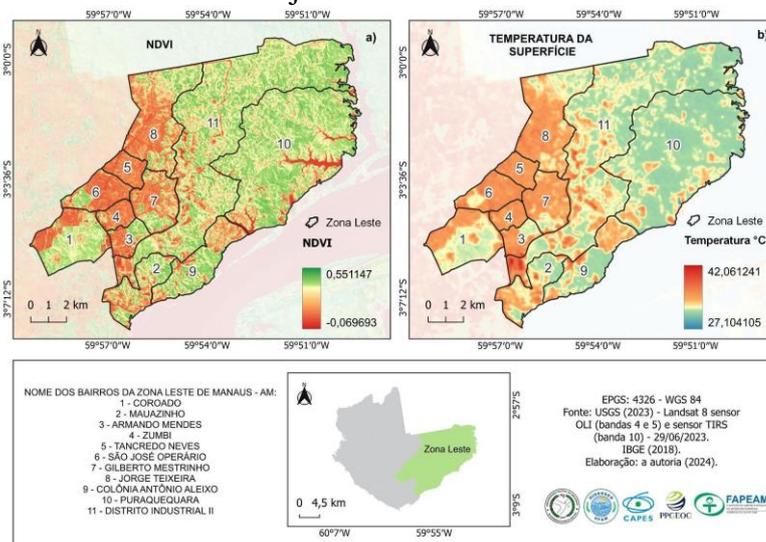
A Figura 2a representa os resultados obtidos do NDVI para a zona leste de Manaus. É possível observar que, as áreas que possuem uma tonalidade verde, correspondem aos locais que tem uma vegetação rasteira e densa, com maior vigor vegetal, onde os valores de NDVI variaram de 0,37 – 0,64. Por outro lado, os valores mais baixos de NDVI foram identificados em cobertura da malha urbana densamente construída e de solo exposto, apresentando um NDVI alternando-se entre 0,12 – 0,26, ao passo que, valores negativos denotam a presença de corpos hídricos.

Bairros como o Zumbi e o Tancredo Neves apresentaram o menor valor de NDVI, pois dispõem de pouca cobertura vegetal e alta densidade demográfica, com 14,07 hab./km² e 15,79

hab./km², respectivamente (IBGE, 2022). Por sua vez, a forte presença de vegetação arbórea e rasteira, somada a menor densidade demográfica em relação aos outros bairros, conferem ao Puraquequara (0,22 hab./km², valores elevados de NDVI, por se diferenciar devido à paisagem com predominância de sítios, balneários e flutuantes). Outros bairros que também possuem, o Distrito Industrial II (0,24 hab./km², há uma forte presença de indústrias) e à Colônia Antônio Aleixo (2,18), valores elevados de NDVI. Destaca-se que, o bairro do Coroados, por ter uma Área de Proteção Ambiental (APA) também vai apresentar NDVI alto por conta da presença da cobertura vegetal.

Concomitantemente, verifica-se que há uma relação inversamente proporcional entre o NDVI e a temperatura da superfície (Figura 2b), pois nos bairros em que há maior NDVI, têm-se menores temperaturas da superfície e naqueles que apresentam solo exposto e são densamente construídos, a temperatura aumenta enquanto o NDVI diminui. Segundo Jensen (2009), um solo que possui cobertura vegetal perde energia através do processo de evapotranspiração e evaporação. Esse processo transforma calor sensível em calor latente, transferindo-o para a atmosfera sem que haja aumento de temperatura.

Figura (2): Mapa de NDVI e Temperatura da Superfície da Zona Leste de Manaus em 29 de junho de 2023

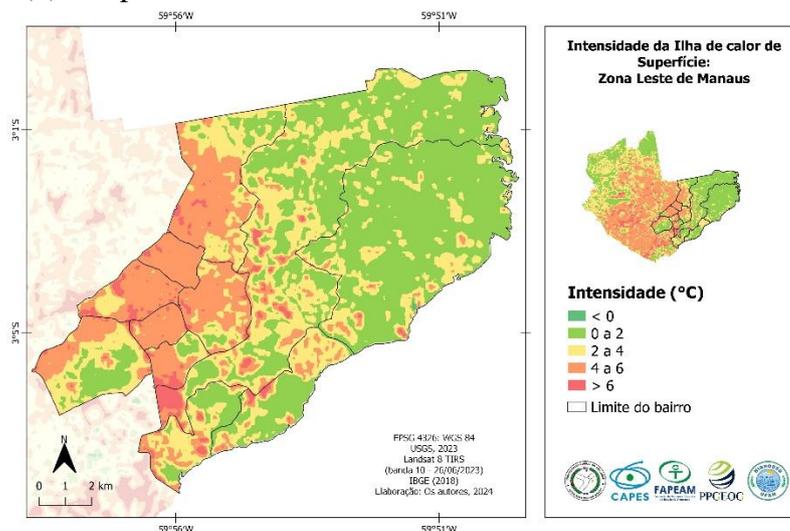


Fonte: USGS (2023) e IBGE (2018). Org.: a autoria (2024)

No entanto, não é somente a ausência de cobertura vegetal e densidade construtiva que contribuem para um elevado gradiente térmico. Segundo Amorim (2017), as altas temperaturas registradas também estão relacionadas à composição heterogênea das moradias em virtude do material construtivo utilizado, em especial, os telhados de fibrocimento, alumínio e zinco, pois possuem uma resposta térmica elevada e, conseqüentemente, um aumento de temperatura e desconforto térmico, como nos bairros do Zumbi e Tancredo Neves.

A espacialização das intensidades permitiu identificar as características térmicas expressas em magnitudes variando de fraca a muito forte, registrando uma diferença de até 15 °C entre os alvos em junho de 2023. A ilha de calor de forte e muito forte magnitude predominaram nos bairros de ocupação consolidada como: São José Operário, Zumbi dos Palmares e Tancredo Neves enquanto nos bairros de ocupação recente como o Puraquequara, pela presença de vegetação de porte arbóreo, a intensidade foi fraca, reforçando o papel da vegetação como atenuadora da temperatura de superfície (Figura 3).

Figura (3): Mapa de intensidade da ilha de calor da Zona Leste de Manaus.



Fonte: Seplancti (2010); USGS (2010); Google Earth(2023). Org.: a autoria (2024)

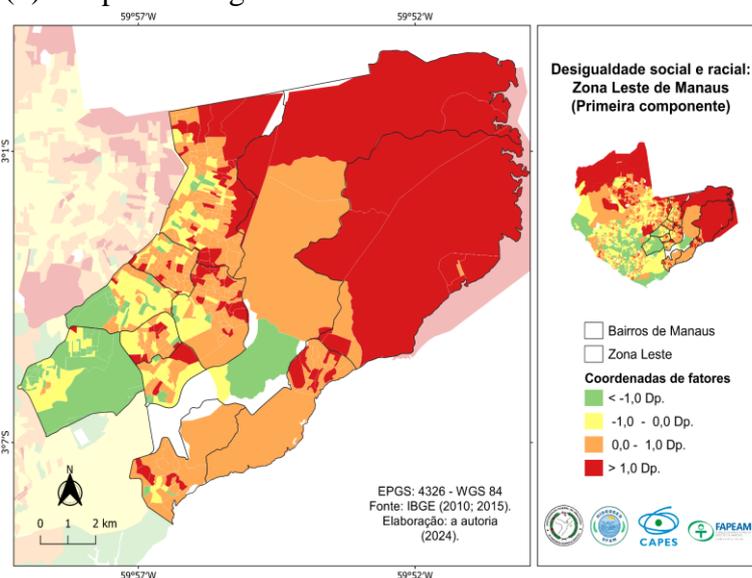
Em relação à métrica da vulnerabilização, em Manaus, o SoVI® foi desenvolvido a partir de um conjunto de 90 variáveis, reduzidas a sete fatores, os quais possuem uma variância explicativa de 50,9% dos dados ao nível percentual. Contudo, ao priorizar a avaliação mais precisa da vulnerabilidade social na cidade, optou-se somente pela análise e representação do primeiro fator (Figura 4), o que significa que pelo menos metade da vulnerabilidade da capital é explicada por esses componentes, conforme Santos (2023).

Foi constatado que o primeiro fator está relacionado ao rendimento e à raça (cor, raça e etnia), conforme as variáveis que apresentaram as maiores cargas fatoriais. A variável dominante englobou a população residente de cor/raça parda, incluindo pessoas alfabetizadas de 7 a 19 anos do sexo masculino com essa característica racial, assim como indivíduos indígenas. Além disso, foram abrangidos indivíduos com rendimento mensal de meio a um salário mínimo, domicílios permanentes do tipo casa, que armazenam água da chuva em cisternas, e residências com um homem como responsável e seis ou mais moradores. Ao espacializar os *scores* da primeira componente, verificaram-se que os lugares com os valores

mais elevados predominaram nos setores censitários urbanos nas zonas Norte e Leste (Santos, 2023).

Isso implica que esse grupo social é o mais vulnerável e tende a possuir uma baixa capacidade de se preparar e se proteger em áreas que apresentam ilhas de calor de superfície. Nessas áreas predominam materiais construtivos de baixo custo, devido às condições de privação econômica dos moradores, o que afeta negativamente o conforto térmico e intensifica as ilhas de calor. Em suma, as variáveis evidenciadas indicam que a condição de vulnerabilidade da metrópole manauara está associada à desigualdade social e racial.

Figura (4): Mapa de desigualdade social e racial na zona leste de Manaus.



Fonte: IBGE (2010; 2015). Org.: a autoria (2024)

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os objetos que fazem parte da superfície terrestre são fontes que emitem radiação eletromagnética, com intensidade de emissão que é proporcional à sua temperatura de superfície. Deste modo, foi possível verificar que a temperatura dos alvos é influenciada pelo tipo de cobertura do solo. Por meio das análises de NDVI, temperatura da superfície e intensidade das ilhas de calor de superfície, evidenciou-se o contraste térmico em áreas densamente construídas e que possuem maior cobertura vegetal, como o Zumbi e do Puraquequara.

Ademais, em Manaus, a condição de vulnerabilidade social está ligada especialmente a fatores de renda e raça, influenciando na baixa capacidade de resposta dos indivíduos aos perigos, como a exposição ao calor excessivo, o que pode ocasionar consequências graves à saúde humana. Embora os resultados da pesquisa possam evidenciar contribuições significativas acerca da temática para a realidade manauara, existem limitações técnicas-metodológicas, como a utilização de imagens de satélites limitadas em quantidade e restritas ao

período seco, devido a ampla nebulosidade frequente na região Amazônica. Conhecer e entender a relação existente entre as ilhas de calor urbano e a vulnerabilidade social pode contribuir para o desenvolvimento de estratégias de prevenção e mitigação dos impactos negativos causados pela exposição ao calor extremo.

Palavras-chave: Ilha de Calor de Superfície; Vulnerabilidade Social; Zona Leste; Manaus.

AGRADECIMENTOS

À Pró-reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação da Universidade Federal do Amazonas (UFAM). À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de Bolsas de Mestrado e Doutorado.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, F.E.O. **As alterações climáticas em Manaus no século XX. 1995.** 1995. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Geociências, Departamento de Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 1995.

AMORIM, M. C. de C. T. Detecção remota de ilhas de calor superficiais: exemplos de cidades de porte médio e pequeno do ambiente tropical, Brasil. **Finisterra**, v. 52, n. 105, p. 111 -133, 2017.

AMORIM, M.C. de C.T. **O clima urbano de Presidente Prudente/SP.** 2000. Tese (Doutorado em Geografia) – Faculdade de Filosofia, Letra e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

BORNSTEIN, R.; LIN, Q. Urban heat islands and summertime convective thunderstorms in Atlanta: Three case studies. **Atmospheric Environment**, v. 34, n. 3, p. 507-516, 2000.

CUTTER, S. L. The vulnerability of Science and the Science of vulnerability. **Annals of the Association of American Geographers**, v. 93, n 1. 2003.

FREITAS, I. G. F.; et al. Analysis of Behavior of Vegetation in the Year of 2016 for the Municipality of Remanso- BA. **Revista Geama**, v. 3, n. 3, p. 41-48, 2017.

GARCÍA, F.F. **Manual de climatología aplicada: clima, medio ambiente y planificación.** 1 ed. Espanha: Editorial Síntesis, 1995.

GRIMMOND, C. S. B.; OKE, T.R. Urban water balance: 2. Results from a suburb of Vancouver, British Columbia. **Water Resources Research**, v. 22, n. 10, p. 1404-1412, 1986.

GRIMMOND, C. S. B.; OKE, T. R.; STEYN, D. G. Urban water balance: 1. A model for daily totals. **Water Resources Research**, v. 22, n. 10, p. 1397-1403, 1986.

JAUREGUI, E. Mexico City's urban Heat Island revisited. **Erdkunde**, v. 47, n. 3, p. 185-195, 1993.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres.** (Tradução) José Neves Epiphany et al. 2 ed. São José dos Campos, SP: Parêntese, 2009.

MONTEIRO, C.A.F. **El estudio de los climas urbanos en las regiones tropicales de America del Sur: la contribución brasileña.** In: Conferência Técnica sobre Climatologia Urbana y sus Aplicaciones com Especial Referência a las Regiones Tropicales. Doc. 11. México, 1984.

OKE, T.R. The urban energy balance. **Progress in Physical geography**, v. 12, n. 4, p. 471-508, 1988.

ROTH, M. Review of atmospheric turbulence over cities. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 126, n. 564, p. 941-990, 2000.

ROUSE, J. W; et al. **Monitoring the vernal advancement retrogradation of natural vegetation**. Final Report Type III. Greenbelt: NASA/GSFC, 1973.

SANTOS, L. K. C. dos. **Análise dos condicionantes climáticos e do material particulado fino nas interações por pneumonia em Manaus - Amazonas**. 2023. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2023.

SILVA, D.A; AGUIAR, F.E.O. Ilha de calor na cidade de Manaus: especulação ou realidade? **Revista Geonorte**, v. 3, n. 10, p. 49-65, 2012.