



ANÁLISE MULTICRITÉRIO COMO SUPORTE PARA ESTABELECIMENTO DE REDE DE MONITORAMENTO DA QUALIDADE DO AR NA CIDADE DO RECIFE

Tamires Gabryele de Lima Mendes
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Brasil
tamires25lima@hotmail.com

Rosane da Silva Avelino dos Santos,
Instituto Federal de Pernambuco - IFPE, Brasil
rosaneavelinoo@gmail.com

Carlos Eduardo Menezes da Silva
Instituto Federal de Pernambuco - IFPE, Brasil
carlosmenezes@recife.ifpe.edu.br

Cristiana Coutinho Duarte
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Brasil
cristiana.duarte@ufpe.br

Anselmo Cesar Vasconcelos Bezerra
Instituto Federal de Pernambuco - IFPE, Brasil
anselmo@recife.ifpe.edu.br

RESUMO – Este artigo visa apoiar estudos ambientais sobre a qualidade do ar, utilizando a análise multicritério como metodologia. O estudo apresenta uma metodologia para identificar áreas apropriadas para a instalação de estações meteorológicas e sensores de poluição do ar em Recife, PE. Embora a região já tenha 23 postos pluviométricos, ainda existem áreas sem monitoramento adequado da qualidade do ar. Utilizando variáveis como Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM), cobertura da terra e topografia, foram identificadas áreas de alta, média e baixa prioridade para a instalação das estações. O método de análise de processo hierárquico (APH ou AHP – Analytic Hierarchy Process) integrado a um SIG revelou-se eficaz na seleção de locais adequados para instalação das estações em áreas sem monitoramento, contribuindo para um planejamento mais eficiente e para a compreensão da qualidade ambiental e do bem-estar social. Essa abordagem pode ser aplicada em regiões com desafios similares de monitoramento ambiental.

Palavras-chave: AHP, monitoramento ambiental, SIG, tomada de decisão.

MULTICRITERIA ANALYSIS AS A SUPPORT FOR ESTABLISHING AN AIR QUALITY MONITORING NETWORK IN THE CITY OF RECIFE-PE

ABSTRACT – This article aims to support environmental studies on air quality, using multicriteria analysis as a methodology. The study presents a methodology to identify suitable areas for the installation of meteorological stations and air pollution sensors in Recife, PE. Although the region already has 23 pluviometric stations, there are still areas without proper monitoring of air quality. Using variables such as the Municipal Human Development Index

(HDI), land use and topography, areas of high, medium and low priority for the installation of stations were identified. The hierarchical process analysis method (APH or AHP – Analytic Hierarchy Process) integrated to a GIS proved to be effective in selecting suitable locations for installing stations in unmonitored areas, contributing to more efficient planning and to the understanding of quality environmental and social well-being. This approach can be applied in regions with similar environmental monitoring challenges.

Keywords: AHP, environmental monitoring, GIS, decision making.

INTRODUÇÃO

A poluição do ar é o principal fator de risco ambiental para a saúde no mundo, sendo responsável, só no ano de 2019, por cerca de 6,4 milhões de mortes em todo o mundo (WORLDBANK, 2022). Ainda que os efeitos da poluição atmosférica e das mudanças climáticas sejam cada vez mais evidentes e significativos em várias áreas da sociedade, vale destacar que esses impactos não são uniformemente distribuídos, e as populações mais vulneráveis são as que sofrem os maiores impactos (FERNANDES; HACON; NOVAIS, 2021). Essas comunidades muitas vezes possuem menor capacidade de adaptação e enfrentam desafios adicionais devido a condições socioeconômicas desfavoráveis.

Existem diferentes tipos de poluentes atmosféricos – material particulado (PM), metano, óxido de nitrogênio, dióxido de enxofre e ozônio, entre outros. Entre esses poluentes, estudos recentes têm consistentemente identificado o PM como o mais perigoso para a saúde humana (YADUNA et al, 2013). Esses poluentes são oriundos de diferentes tipos de atividades humanas, muitas das quais desenvolvidas em ambientes urbanos e industriais.

No ambiente urbano, a poluição atmosférica proveniente de fontes fixas (como indústrias e usinas de energia) e fontes móveis (como veículos) pode impactar as variáveis climáticas e a morfologia urbana de várias formas. A atividade humana e as mudanças climáticas desempenham papéis interconectados (YNOUE et al., 2017). A interação entre a atividade humana, as mudanças climáticas e a poluição atmosférica afetam tanto as variáveis climáticas quanto a morfologia urbana.

Nesse sentido, as cidades concentram uma grande parte dos problemas oriundos das transformações ambientais, e ao mesmo tempo funcionam como catalisadoras de poluentes pela densidade e mobilidade populacional (BRAZ; LONGO, 2021). E por isso, o planejamento das cidades enfrenta desafios complexos, e para lidar de forma mais eficiente com essas demandas, o planejamento urbano precisa adotar uma abordagem interdisciplinar no processo de tomada de decisão para a gestão dos problemas urbanos (ABRANCHES, 2013).

Por isso, para ajudar a estabelecer prioridades para a tomada de decisões públicas, em uma realidade na qual os formuladores de políticas não estão apenas preocupados com a ligação entre a poluição do ar e a saúde, mas principalmente com os fatos relacionados aos custos e benefícios da mitigação das ações a serem tomadas (YADUNA et al, 2013), se faz necessário um adequado planejamento para o monitoramento da qualidade do ar e dos seus potenciais impactos.

Na cidade do Recife, existe uma ausência de monitoramento adequado da qualidade do ar, assim como uma escassez de dados pontuais nos bairros, abrangendo tanto aspectos termoambientais quanto outras variáveis relevantes. É nesse contexto, que a participação de pesquisadores se torna fundamental, uma vez que podem contribuir com inovações e preencher essa lacuna no processo de monitoramento. É importante ressaltar que a situação no Recife é especialmente desafiadora, uma vez que a cidade é classificada como a 16ª mais vulnerável aos impactos das mudanças climáticas no mundo (SANTOS MELO et al., 2022). Além disso, é a capital mais desigual do Brasil, enfrentando desafios socioeconômicos significativos (IBGE, 2020).

Nos últimos tempos, diversos estudos têm ressaltado a importância de enfrentar e mitigar as mudanças climáticas globais através do combate à poluição do ar em nível local (CIFUENTES et al, 2001; WORDEN et al, 2012). Por isso é crescente o uso de sensores de qualidade do ar de baixo custo para monitoramento ambiental (RAYSONI et al, 2023), como forma de contemplar áreas que não possuem monitoramento adequado.

Porém, diante da grande lacuna de informações acerca dos níveis locais de poluição, sobre as variáveis socioeconômicas e ambientais associadas, se faz necessário o desenvolvimento de protocolos adequados de monitoramento. Em especial em países em desenvolvimento e regiões muito desiguais.

Por isso a análise multicritério é uma alternativa que pode ser utilizada como um instrumento de suporte à tomada de decisão em diversas áreas (MOURA e JANKOWSKI, 2016; JANKOWSKI, 1995). O método de análise multicritério denominado Analytic Hierarchy Process (AHP) conforme definido por Saaty (2008), é uma abordagem que utiliza comparação por pares para medir e estabelecer escalas de prioridade com base no julgamento de especialistas. Diversos estudos têm abordado o uso do método AHP em análises multicritérios e Sistemas de Informação Geográfica (SIG) para estudos urbanos, abrangendo diversas áreas de atuação, como estudos ambientais (GOMES, 2015; SOUZA, 2017), sociais (MALTA et al., 2017), transporte (FELIX, 2017) e turismo (PINTO, 2015). O método AHP se destaca pela sua capacidade de estruturar problemas complexos que envolvem múltiplas variáveis por meio de uma hierarquia, facilitando a tomada de decisão com base no julgamento de especialistas.

O principal objetivo desse método é auxiliar o tomador de decisão na seleção da melhor alternativa, considerando múltiplos critérios e incorporando as opiniões de diferentes atores envolvidos no processo (JANKOWSKI, 1995). Quando aplicada a problemas com aspecto espacial, a integração entre análise multicritério e Sistema de Informações Geográficas (SIG) é uma combinação de métodos e ferramentas para analisar dados geográficos e obter informações relevantes para a tomada de decisão (MALCZEWSKI e RINNER, 2015). Essa abordagem permite uma análise mais abrangente e sistêmica, considerando a variabilidade espacial dos critérios e fornecendo uma visão mais completa do problema em estudo.

Nesse contexto, este artigo tem como objetivo analisar os fatores socioeconômicos e ambientais que influenciam na exposição à poluição atmosférica e às mudanças climáticas na cidade do Recife. E por meio de uma análise multicritério contribuir para a identificação de áreas mais propícias para a instalação de uma rede de monitoramento de parâmetros de qualidade do ar utilizando sensores de baixo custo.

METODOLOGIA

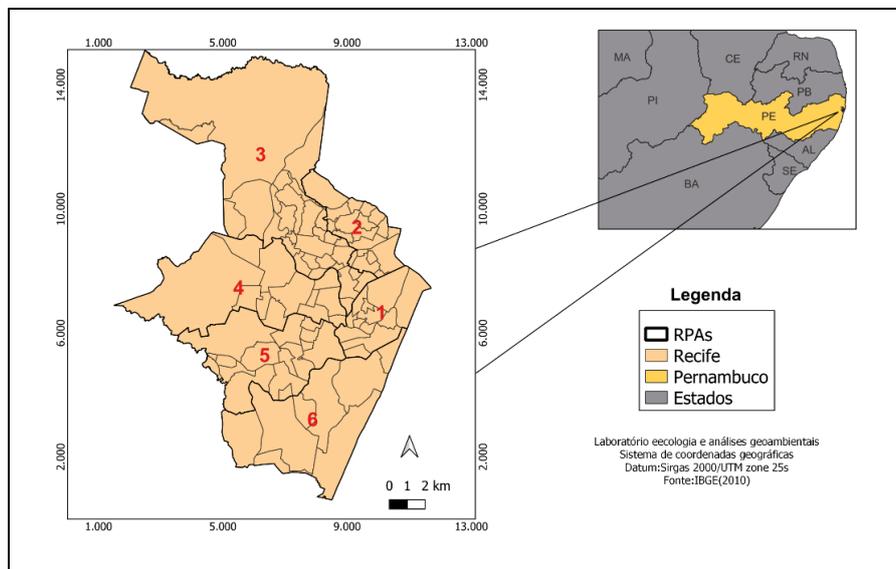
Área de estudo

A área de estudo abrange a cidade do Recife, capital do estado de Pernambuco, localizada na costa oriental da Região Nordeste do Brasil (NEB) (Figura 1).

Sua população estimada é de 1.488.920 habitantes (IBGE, 2022), e seu território compreende uma área de 218,50 km², subdividida em 94 bairros agrupados por 6 Regiões Político-Administrativas (RPA). Para compreender a área analisada, é essencial levar em consideração diversos condicionantes climáticos. A região em questão apresenta um padrão de precipitação anual significativo, caracterizado por alta variabilidade pluviométrica e ventos predominantes provenientes do Sudeste ao longo de todo o ano (Wanderley et al., 2018). O clima é classificado como tropical litorâneo quente e úmido, exibindo temperaturas elevadas tanto diariamente quanto ao longo do ano. A umidade do ar é elevada, com média em torno de 80%, e a precipitação média anual ultrapassa 2.000 mm. É notável a presença de dois padrões distintos:

uma estação seca que abrange de setembro a fevereiro (primavera-verão) e uma estação chuvosa de março a agosto (outono-inverno), marcada por eventos intensos de precipitação (Wanderley et al., 2017; Barros; Lombardo, 2013), desencadeados sobretudo pela atuação dos Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOLs). Estes fatores combinados moldam o ambiente climático da região, exercendo um impacto significativo na dinâmica atmosférica e na qualidade do ar local.

Figura 1. Mapa de localização da área da cidade do Recife –PE.



Fonte: Elaboração dos autores (2023).

Procedimento metodológico

A metodologia adotada neste estudo seguiu três etapas. A primeira etapa foi realizada em três estágios: I) Realização de uma revisão bibliográfica abrangente do tema de estudo. II) Análise da distribuição de estações e postos meteorológicos pela cidade do CEMADEN, III) Utilização de softwares, como o Arcgis 10.8 pro (licença do CEPETC do IFPE) e o QGIS 3.20.

Na segunda etapa foi utilizado o método de análise multicritério Analytic Hierarchy Process (AHP). Na aplicação do método, a comparação entre as variáveis é realizada por meio de uma escala numérica que indica quantas vezes um elemento é considerado mais importante que outro em relação ao objetivo da análise. A Figura 2 apresenta a escala numérica de importância de valores absolutos do AHP, conforme proposta por Saaty (2008).

Figura 2. Escala de valores absolutos AHP.

Escala numérica	Escala Conceitual	Descrição
1	Igual	Os dois elementos comparados contribuem igualmente para o objetivo.
3	Moderada	O elemento comparado é ligeiramente importante ao outro.
5	Forte	A experiência e o julgamento favorecem fortemente o elemento em relação ao outro.
7	Muito Forte	O elemento comparado é muito mais forte em relação ao outro, e tal importância pode ser observada na prática.
9	Absoluta	O elemento comparado apresenta o mais alto nível de evidência possível a seu favor.
2,4,6,8	Valores intermediários entre dois julgamentos, utilizados quando o decisor sentir dificuldade ao escolher entre dois graus de importância adjacentes.	

Fonte: Adaptado de Saaty, 2008.

A análise multicritério pelo método AHP foi utilizada para identificação de áreas para instalação de estações em ambiente SIG (Figura 3). A primeira etapa da metodologia é voltada para identificação de áreas com alto potencial de inserção das estações. Assim, considerando o conhecimento adquirido através de outros estudos relacionados ao tema (CARVALHO, 2010; RESENDE et al., 2012; REIS, 2012). Foram identificados e definidos três critérios principais de análise nesta etapa do estudo: (a) Uso e ocupação do solo, (b) Índice de Desenvolvimento Humano do município (IDHM) e (c) Topografia. A hierarquização dos critérios foi realizada utilizando a calculadora online BPMSG de critérios AHP e a escala de Saaty (2008), que é uma abordagem comumente utilizada para a comparação de critérios e atribuição de pesos.

Figura 3. A) Pesos resultantes para os critérios com base em suas comparações pareadas e B) Os pesos resultantes no autovetor principal da matriz de decisão.

Gato		Prioridade	Classificação	(+)	(-)
1	IDHM	76,1%	1	2,7%	2,7%
2	Uso e ocupação do solo	15,8%	2	0,6%	0,6%
3	Topografia	8,2%	3	0,3%	0,3%

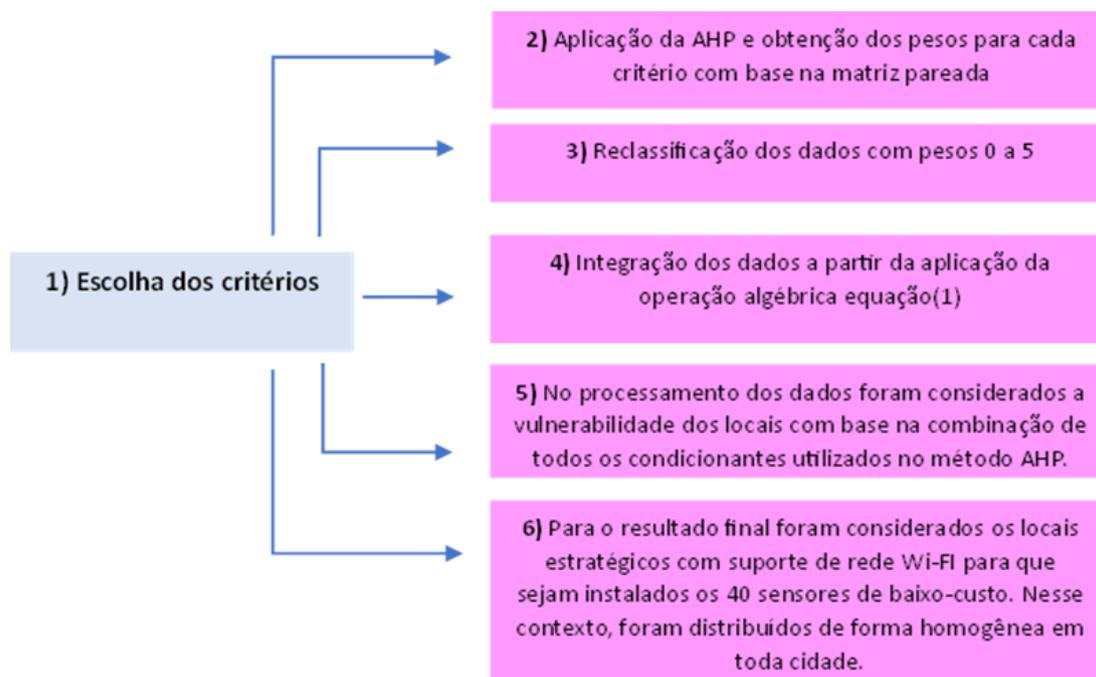
	1	2	3
1	1	5,00	9h00
2	0,20	1	2,00
3	0,11	0,50	1

Fonte: Calculadora BPMSG (2023).

Utilizando os resultados gerados pela AHP, foram atribuídos pesos para os quatro critérios e realizadas 3 comparações. A razão de consistência (CR- consistency ratio) obtida foi de 0,1%, que está dentro do limite aceitável de 10%, assegurando, assim, a coerência e a confiabilidade dos resultados. Isso significa que a hierarquização dos critérios foi bem realizada, e os pesos atribuídos refletem de forma consistente as relações de importância estabelecidas para a tomada de decisão. Cada critério foi trabalhado como camada de dados no SIG, compondo uma avaliação da variável em relação ao objetivo. De acordo com Moura e Jankowski (2016), todas as camadas devem ter a mesma escala de representação, e mesma escala de valores (normalização). Assim, todas as camadas foram representadas em formato matricial (raster), com resolução espacial de 30m e escala numérica variando entre 0 e 10.

Ainda na segunda etapa do estudo realizamos o pré-processamento dos dados, com adaptações necessárias em relação ao método AHP, com a normalização e soma ponderada dos dados matriciais no software ArcGIS. Para este procedimento, os dados em shapefile do uso e ocupação do solo, do IDHM e dos parques urbanos do município do Recife, foram transformados em raster, pela ferramenta Polygon to Raster no método Spatial Analyst 3D. Após esse procedimento cada raster foi submetido ao método reclassify, considerando suas respectivas variáveis e adaptações necessárias, sendo adotado o método de matriz de pesos de 0 a 5. No qual 0 são para áreas menos suscetíveis a poluição atmosférica e 5 para áreas mais suscetíveis a poluição atmosférica.

Figura 4. Fluxo metodológico



Fonte: Elaboração dos autores (2023).

Na terceira etapa, aplicamos a metodologia do AHP, com as adaptações realizadas. Onde os dados dos parâmetros de indicadores da suscetibilidade a poluição atmosférica foram submetidos através de uma operação algébrica, com o uso da equação 1.

$$SC = 0.761 * \text{“IDHM.tif”} + 0.158 * \text{“UT.tif”} + 0.082 * \text{“T.tif”} \quad (1)$$

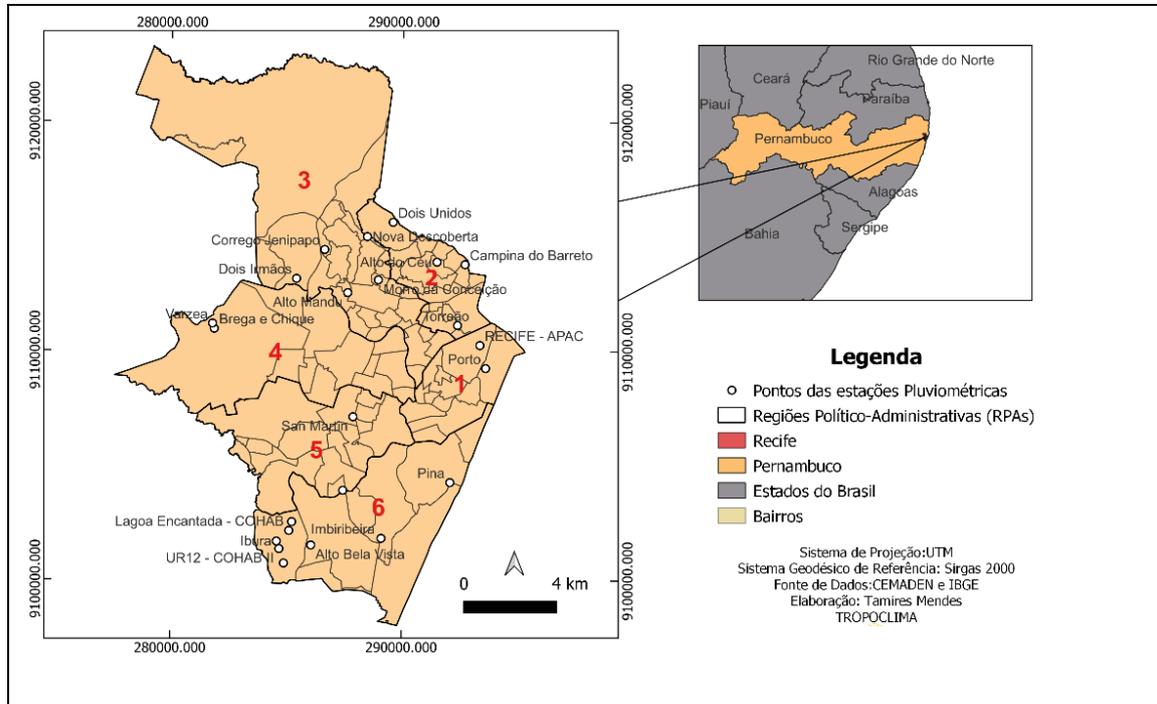
Na referida equação o SC= corresponde a Suscetibilidade; IDHM= Suscetibilidade ao tema índice de Desenvolvimento Econômico Municipal; o T= Suscetibilidade para o tema Topografia; UT= Suscetibilidade ao tema Cobertura da Terra. Os seguintes dados foram processados na ferramenta Plus, presente no software ArcMap 10.8, onde após esse procedimento, foi possível obter o mapa de suscetibilidade à poluição atmosférica no município do Recife. Assim, a imagem resultante desta integração foi classificada em três classes quanto aos níveis de prioridade: alta, média e baixa, facilitando a identificação dos locais mais adequados para a instalação das estações meteorológicas e de monitoramento da qualidade do ar. É relevante destacar que algumas variáveis não foram incluídas na análise do AHP, pois são requisitos primordiais, como locais estratégicos que englobam parques, unidades de ensino e de saúde. Esses locais serão essenciais para a priorização das instalações, devido ao uso da rede Wi-Fi para as estações e sensores. Com o resultado, os níveis de prioridades locais e os locais estratégicos serão combinados com buffers de diâmetro específico para, enfim, definir os locais ideais para a instalação das estações de monitoramento.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram considerados neste estudo um total de 23 postos pluviométricos. Essas estações estão distribuídas de forma irregular nas diferentes RPAs do município. Nesse contexto, a distribuição

dos postos pluviométricos mostra uma concentração central nas RPAs 2 e 6, enquanto nas RPAs 1, 3, 4 e 5 há uma menor presença dessas estações, como pode ser observado na figura 5.

Figura 5. Mapa de localização da área da cidade do Recife –PE, com destaque para o limite dos bairros, das Regiões Político-Administrativas (RPAs) e os Pontos das estações pluviométricas.



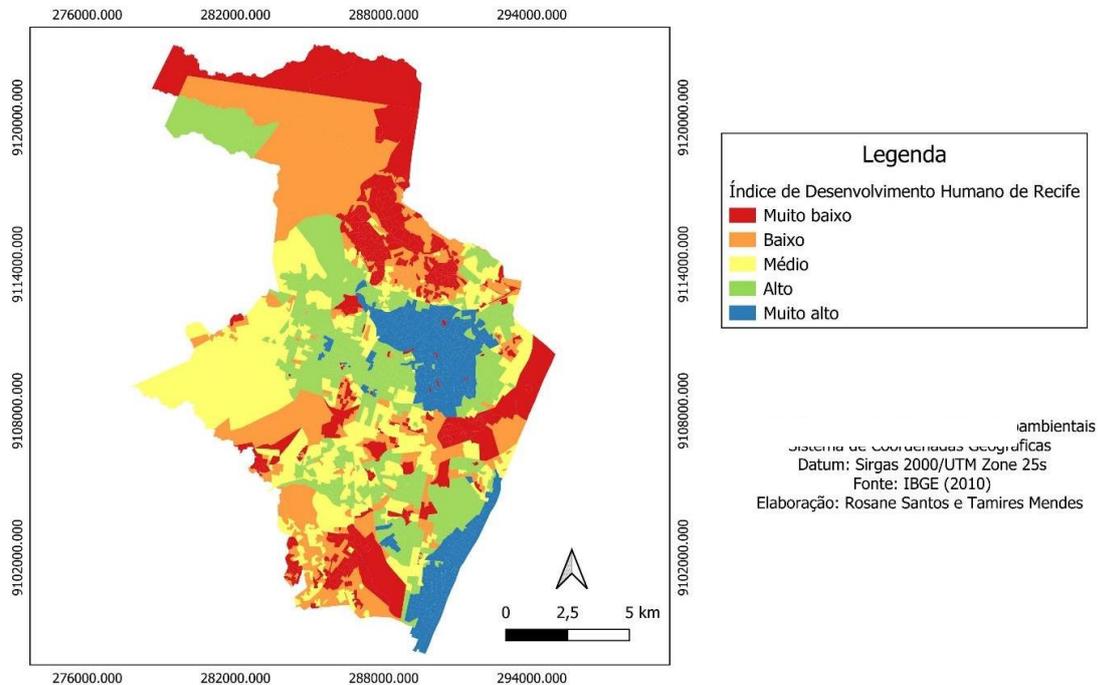
Fonte: Elaboração dos autores (2023).

Essa distribuição heterogênea evidencia a necessidade de considerar as características específicas de cada região ao analisar os dados pluviométricos na cidade do Recife. Compreender as variáveis climáticas além dos dados de precipitação é de suma importância para o estudo da qualidade do ar, pois permite analisar como esses elementos interagem com os poluentes atmosféricos. Além das chuvas, é necessário considerar fatores como temperatura, umidade do ar, velocidade e direção dos ventos, radiação solar, entre outros. Esses elementos influenciam diretamente a dispersão, concentração e reação dos poluentes presentes na atmosfera. Estudos como os de Yang et al. (2020) e Yuan et al. (2014) demonstram que a transformação, deposição, diluição e difusão dos poluentes na atmosfera são influenciadas pelos fatores climáticos locais. No entanto, é importante destacar que tanto a estação automática quanto a estação convencional, localizadas na Várzea, encontram-se inoperantes desde 2021. Essa situação tem acarretado na quebra da sequência climatológica na cidade do Recife, impossibilitando a coleta contínua e precisa de dados meteorológicos como temperatura, umidade e vento.

A partir dos critérios adotados, identificou-se a hierarquização para Recife de acordo com a ordem estabelecida pela calculadora AHP. Dessa forma, o IDHM tem prioridade de 76,1% (figura 3.a). Este índice é uma importante ferramenta que oferece uma visão abrangente dos dados municipais. Para isso, utilizou-se os dados do IBGE, representados por setor censitário, no qual inclui indicadores como educação, renda e emprego, possibilitando comparações ao longo do tempo e com outros municípios do país, incluindo capitais (BARROS et al., 2021). Sua relevância reside no fato de que serve como referência para orientar políticas públicas e

enfrentar questões da realidade local. Para cumprir efetivamente esse papel, é fundamental que o IDHM seja transparente e reflita com precisão o perfil de cada bairro da cidade (figura 6), fornecendo informações essenciais para a tomada de decisões estratégicas e a alocação adequada de recursos para melhorar as condições de vida da população.

Figura 6. Mapa de Índice de Desenvolvimento Humano de Recife-PE.



Fonte: Elaboração dos autores adaptados de Souza et. al (2018).

A análise da Figura 6 tem como objetivo descrever e explicar os recortes espaciais utilizados para a formação do IDHM, considerando os dados do Censo do IBGE de 2010. Os parâmetros de classificação são baseados nos valores observados na Figura 8, onde o IDHM é dividido em cinco intervalos: 0,807 – 0,961 (muito alto); 0,744 - 0,807 (alto); 0,699 - 0,744 (médio); 0,673 - 0,699 (baixo); e 0,000 - 0,673 (muito baixo). Esses intervalos refletem diferentes níveis de desenvolvimento humano nas áreas analisadas, proporcionando uma visão clara e comparativa das condições de vida da população em cada região. Ao considerar esses parâmetros, é possível identificar padrões e disparidades socioeconômicas e de qualidade de vida, auxiliando na formulação de políticas públicas direcionadas para o desenvolvimento e melhoria dessas áreas.

Dessa forma, é interessante notar que os bairros com um índice mais alto de IDHM em Recife, como Boa Viagem e Graças, estão inseridos nas RPAs 3 e 6. Por outro lado, os bairros com índices mais baixos, como Santo Amaro, Bomba do Hemetério e IPSEP, estão localizados nas RPAs 1, 2 e algumas do RPA 6, respectivamente. Essa correlação entre as RPAs e os índices de IDHM permite uma melhor compreensão da distribuição do desenvolvimento humano na cidade. Na reclassificação das camadas, foram atribuídos pesos 1 para os locais com IDH mais alto, 3 para os locais com IDH médio e 5 para os locais com baixo IDH. Essa estratégia de atribuição de pesos permite a diferenciação e a hierarquização das áreas de acordo com seus níveis de desenvolvimento humano. Locais com IDH mais alto recebem um peso menor, indicando uma menor necessidade de intervenção ou prioridade, enquanto locais com IDH mediano recebem um peso intermediário e locais com baixo IDH recebem um peso maior,

indicando maior necessidade de ações e investimentos para melhoria das condições socioeconômicas e de qualidade de vida.

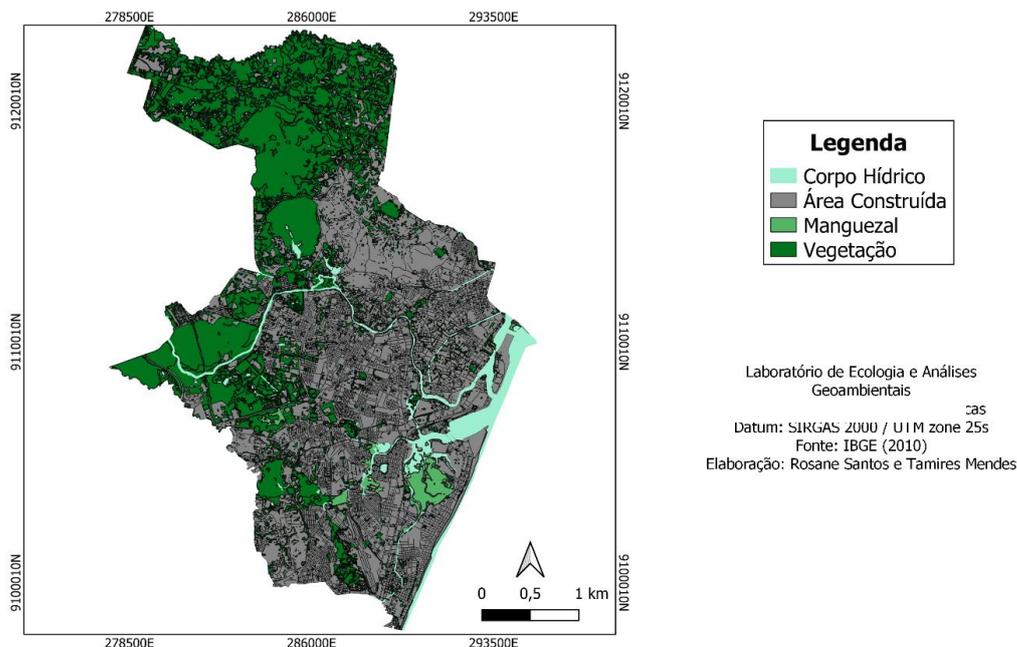
De acordo com Santos e Santos (2010), o mapeamento da cobertura da terra é uma ferramenta essencial para compreender as rápidas transformações da paisagem, proporcionando informações cruciais para a construção de cenários ambientais e indicadores relevantes. Na Figura 7, foram destacados os aspectos da vegetação, corpos hídricos, manguezais e áreas construídas, pois essas variáveis, em conjunto com aspectos climáticos e poluentes, podem exercer influência significativa no ambiente.

Ao examinar esses elementos, é viável identificar padrões e tendências no uso do solo, bem como avaliar o impacto das atividades humanas na paisagem. Durante a reclassificação das camadas, atribuíram-se pesos de 1 para recursos hídricos e vegetação, com o manguezal incluído nessa categoria. Por outro lado, a área construída recebeu peso 5, uma vez que é considerada uma zona de baixa qualidade ambiental para o estudo em questão, fatores esses que influenciam a dinâmica ambiental da região em estudo.

A topografia é um componente físico de extrema importância para a análise do ambiente. Dentre as aplicações das variáveis derivadas de dados topográficos, como declividade e orientação das vertentes, destacam-se a delimitação de áreas favoráveis para assentamentos humanos, a identificação de regiões com risco de movimentos de massa, o mapeamento da declividade e do potencial erosivo, bem como o estudo dos processos geomorfológicos de natureza diversa (Silva Jr. e Fuckner, 2010).

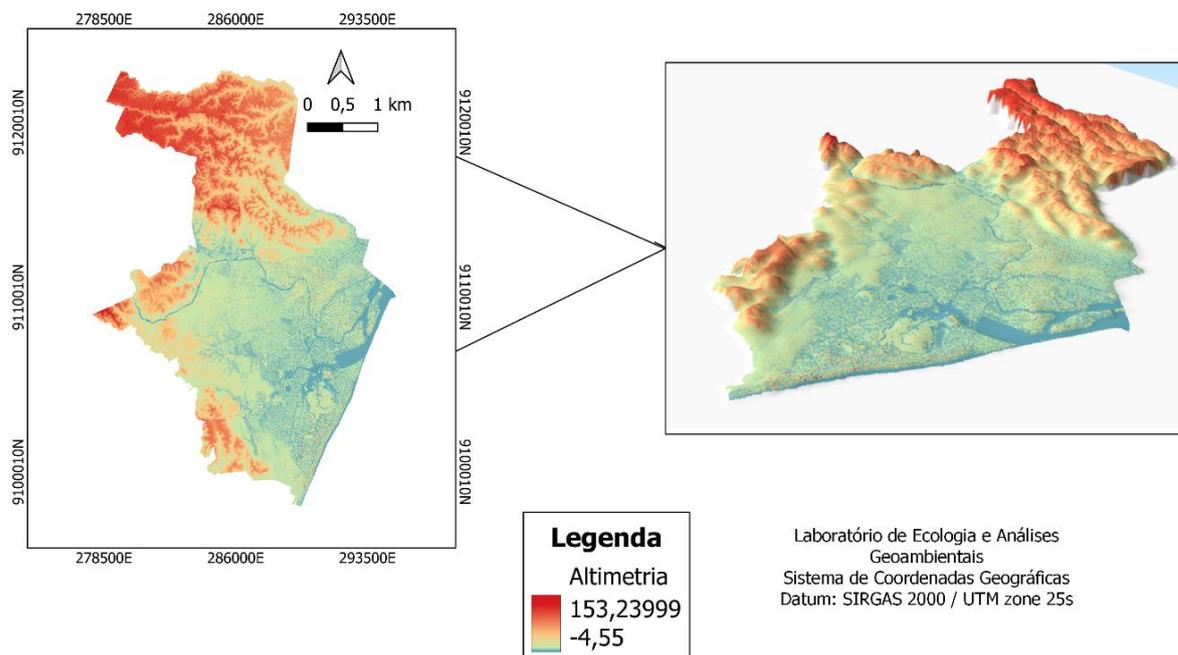
É relevante ressaltar que a topografia de Recife, na sua parte litorânea, é predominantemente plana, com algumas elevações presentes na parte mais adentro da cidade (figura 8). Essa configuração topográfica, quando considerada em estudos relacionados a poluentes atmosféricos ou análises climáticas, pode favorecer o aumento da ocorrência de chuvas ou a acumulação e dispersão de poluentes, criando padrões específicos de comportamento ambiental na região que precisam ser estudados.

Figura 7. Mapa de cobertura da terra de Recife-Pe.



Fonte: Elaboração dos autores (2023).

Figura 8. Mapa da Elevação da cidade do Recife-PE.

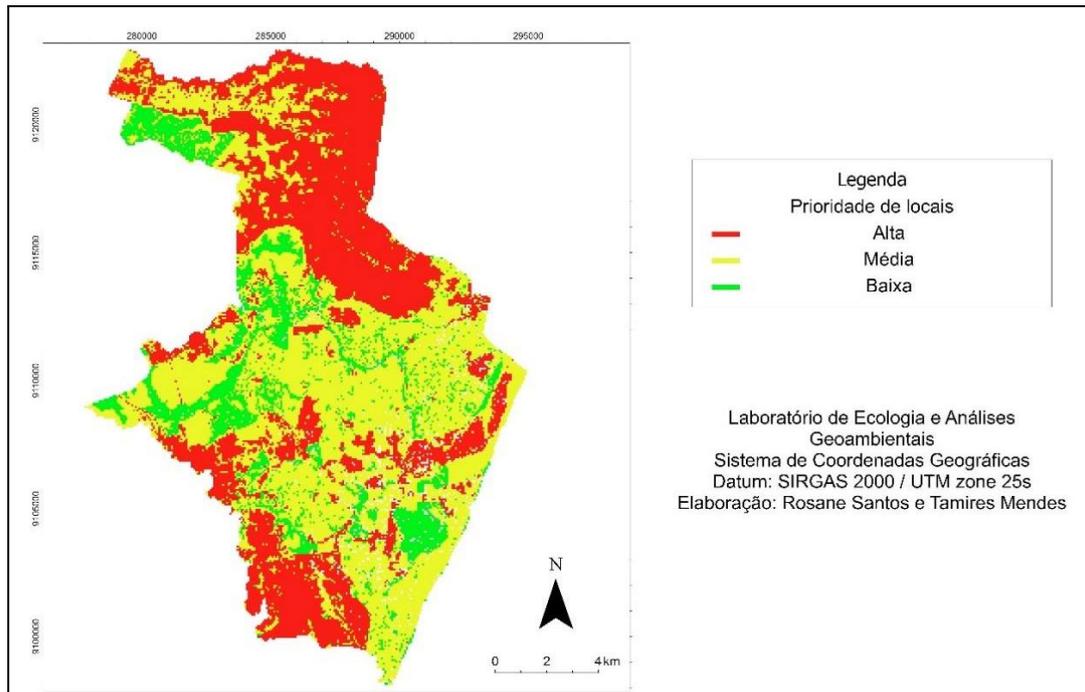


Fonte: Elaboração dos autores (2023).

Ao realizar a reclassificação das camadas, foram estabelecidas três classes: planície, com peso 2, topo de encostas com peso 1, e encostas com peso 5. Essa categorização foi adotada considerando as características específicas de cada região em relação ao acúmulo de poluentes atmosféricos. Nas áreas classificadas como topo de encostas, atribuiu-se o peso 1 por entender que essas regiões seriam áreas com uma menor probabilidade de acúmulo de poluentes. Já para as áreas de planície, optou-se pelo peso 2, uma vez que essas áreas podem apresentar um potencial intermediário de acúmulo de poluentes. Por fim, nas encostas, escolheu-se o peso 5, pois acredita-se que essas regiões estão mais suscetíveis ao acúmulo de poluentes atmosféricos. Essa reclassificação foi fundamental para identificar e priorizar locais com diferentes níveis de exposição e sensibilidade à poluição do ar. Os resultados da combinação das reclassificações demonstraram três níveis de prioridades locais: alta, média e baixa (Figura 9).

A análise multicritério AHP foi fundamental para identificar com precisão os locais de maior prioridade e adequados para instalar estações meteorológicas e monitorar a qualidade do ar em Recife. As variáveis analisadas e integradas na classificação do IDHM, ocupação do solo e topografia também foram consideradas, revelando áreas de alta prioridade nas RPAs 3, 2, além de alguns bairros das RPAs 1 e 6. Nas áreas de média prioridade, encontramos uma distribuição mais abrangente em todas as RPAs. As áreas de baixa prioridade coincidem com regiões que apresentam características como áreas verdes, manguezais e bairros com alto índice de desenvolvimento humano.

Figura 9. Mapa Integrado das Variáveis Reclassificadas por Álgebra de Mapas, destacando locais prioritários.

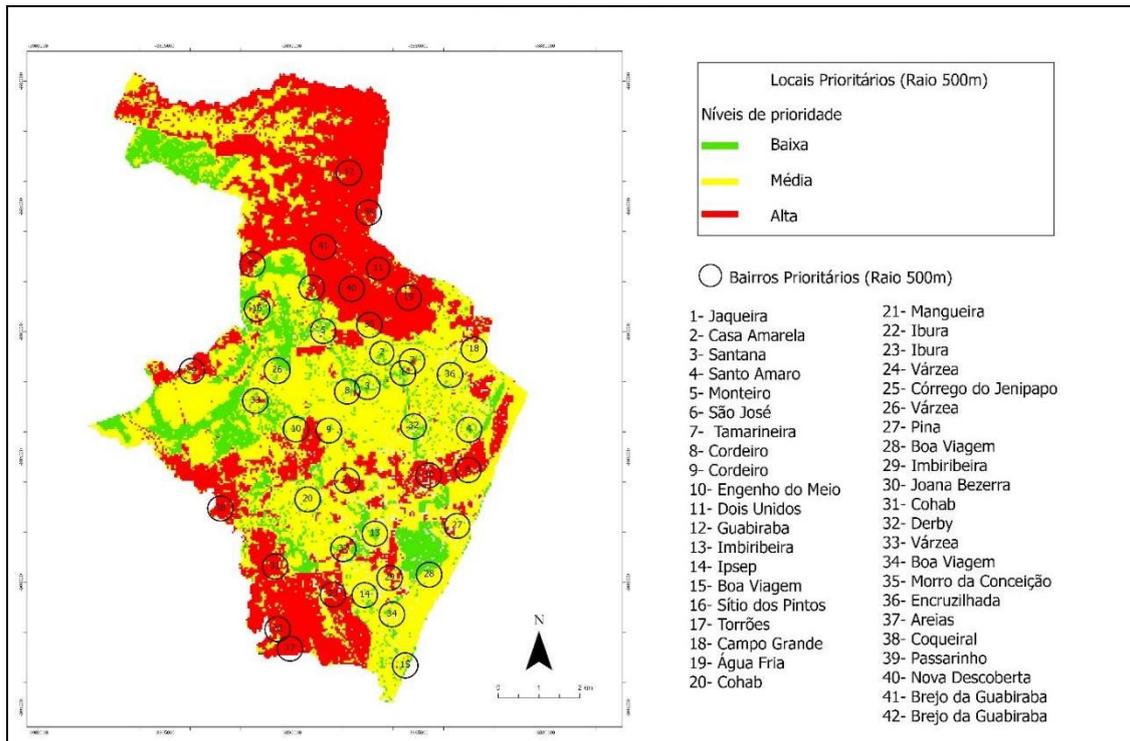


Fonte: Elaborada dos autores (2023).

A partir dos resultados obtidos, foi utilizado a ferramenta buffer disponível no software QGIS para criar um raio de alcance de 500 metros ao redor de pontos específicos (figura 10). Esses pontos foram selecionados com base em unidades educacionais, de saúde e parques localizados em zonas de alta prioridade. Além disso, esses locais possuem acesso à rede Wi-Fi e a infraestrutura necessária para a instalação dos dispositivos de monitoramento. Essa estratégia envolve a criação de uma espécie de "área de influência" ao redor desses pontos prioritários. O buffer de 500 metros foi uniformemente aplicado ao redor de cada ponto, criando uma sobreposição de áreas.

Essa estratégia permitirá uma cobertura eficiente dessas áreas prioritárias, fornecendo informações valiosas para a gestão urbana e tomada de decisões em relação à qualidade do ar e das condições climáticas nessas regiões. Dessa forma, com os dados coletados, será possível analisar as variáveis climáticas, como precipitação, vento, umidade e temperatura, em conjunto com a morfologia urbana, investigando suas interferências no acúmulo e dispersão de poluentes. Além disso, as estações de monitoramento permitirão estudar o efeito da vegetação em conjunto com essas variáveis e os poluentes. Outros estudos conduzidos pelo Laboratório de Ecologia e Análises Geoambientais do IFPE poderão fazer uso dos dados obtidos para investigar diversas questões ligadas ao ambiente urbano. Estas incluem a análise da temperatura e do conforto térmico, a avaliação da vulnerabilidade diante das variações de temperatura, bem como o planejamento urbano considerando episódios de intensas chuvas.

Figura 10. Mapa de distribuição dos buffers nos locais prioritários para a instalação dos sensores de monitoramento da qualidade do ar.



Fonte: Elaboração das autoras (2023).

CONCLUSÕES

Os resultados do método AHP demonstraram sua utilidade ao hierarquizar as variáveis, enquanto o método de reclassificação das camadas selecionadas por meio da álgebra de mapas se revelou eficaz na criação do produto final, categorizando as áreas em riscos prioritários distintos - baixo, médio e alto. Dessa forma, a importância mais significativa desses resultados reside na capacidade de orientar a escolha de locais apropriados para a instalação de estações meteorológicas e de monitoramento da qualidade do ar.

Nesse sentido, essa seleção, sendo um desafio complexo de planejamento, deve considerar critérios sociais, ambientais e econômicos para tomar decisões informadas.

Desse modo, ainda não se conhece completamente a influência de fatores não considerados na decisão, tais como variações temporais, aspectos sazonais e a interação entre os diferentes critérios avaliados. Para preencher essa lacuna, seria proveitoso realizar pesquisas adicionais que explorem o impacto desses fatores não abordados e aprofundar o entendimento das relações entre critérios específicos na tomada de decisão.

Portanto, este trabalho oferece uma valiosa contribuição para a gestão pública e a academia. Ao identificar áreas prioritárias para monitoramento, ele facilita a tomada de decisões embasadas e a alocação eficiente de recursos para melhorar a qualidade do ar e o planejamento urbano.

Além disso, serve como ponto de partida para futuras investigações em regiões com carência de monitoramento ambiental, promovendo uma abordagem mais sustentável e informada para o desenvolvimento urbano.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE), pelo financiamento do projeto, bem como pelo suporte às bolsas de PIBIC e Doutorado de uma das autoras e ao Instituto Federal de Ciência e Tecnologia (IFPE) e Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) pelo suporte aos laboratórios.

REFERÊNCIAS

- ANJOS, R. S.; WANDERLEY, L.S.; NÓBREGA, R.S. Análise espacial da precipitação e possíveis fatores que contribuem para sua espacialização em Recife-PE. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 13, p. 018, 2020.
- Barros, S. A., & Lins Barros, D. (2021). Uma Leitura Dos Recortes Espaciais Que Compõem O Idh-M: O Caso Dos Bairros Das Graças E Boa Viagem No Recife. *GEOgraphia*, v. 23, n.50,2021.
- Castán Broto V, Bulkeley H. A survey of urban climate change experiments in 100 cities. *Glob Environ Chang*. 2013;23(1):92–102. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2012.07.005.
- CARVALHO, G. Análise espacial urbano-socioambiental como subsídio ao planejamento territorial do município de Sabará. 2010. 145f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Geografia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.
- Chan, L.Y., & Kwok, W.S. (2001). Roadside suspended particulates at heavily trafficked urban sites of Hong Kong: seasonal variation and dependence on meteorological conditions. *Atmospheric Environment*, 35(18), 3177-3182. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(00\)005045](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(00)005045).
- Choi, W., Ho, CH. & Kim, KY. Critical contribution of moisture to the air quality deterioration in a warm and humid weather. *Sci Rep* 13, 4260 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-31316-1>
- Cifuentes L, Borja-Aburto VH, Gouveia N, Thurston G, Davis DL. Assessing the health benefits of urban air pollution reductions associated with climate change mitigation (2000–2020): Santiago, Sao Paulo, Mexico City and New York City. *Environ Health Perspect*. 2001;109:419. doi: 10.1289/ehp.01109s3419.
- DERISIO, J. C. Introdução ao controle de poluição ambiental. 3. ed. São Paulo: SIGNUS, 2007. 192 p.
- Echenique, M.H., Hargreaves, A.J., Mitchell, G., & Namdeo, A. (2012). Growing Cities Sustainably: Does Urban Form Really Matter? *Journal Of The American Planning Association*, 78(2), 121-137. <https://doi.org/10.1080/01944363.2012.666731>.
- Egide Kalisa, Sulaiman Fadlallah, Mabano Amani, Lamek Nahayo, Gabriel Habiyaremye, Ewing, R., & Cervero, R. (2010). Travel and built environment: A metaanalysis. *Journal of The American Planning Association*, 76(3), 265-294. <https://doi.org/10.1080/01944361003766766>
- FELIX, R. Avaliação de áreas urbanas baseada no desenvolvimento orientado ao transporte sustentável (DOTS). 2017. 127f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento, Tecnologias e Sociedade da Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2017.
- FERNANDES, T.; HACON, S. D. S.; NOVAIS, J. W. Z. Mudanças Climáticas, Poluição Do Ar E Repercussões Na Saúde Humana: Revisão Sistemática. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 28, n. 1, p. 138–164, 2021.
- Givoni, B. (1998). *Climate Considerations in Building and Urban Design*. USA: Wiley Pub
- GOMES, R. Integração dos métodos AHP e SIG como instrumento de análise do nível de qualidade ambiental em bacias hidrográficas: Estudo de caso bacia do Rio Melchior – DF. 2015. 105 f. Dissertação (Mestrado). Instituto de Geociências Aplicadas (Geoprocessamento e Análise Ambiental) da Universidade de Brasília, Brasília, 2015.
- Harlan SL, Ruddell DM. Climate change and health in cities: impacts of heat and air pollution and potential co-benefits from mitigation and adaptation. *Curr Opin Environ Sustain*. 2011;3(3):126–34. doi: 10.1016/j.cosust.2011.01.001.

IBGE, I. B. D. G. E. E. Síntese de Indicadores Sociais: Uma análise das condições de vida da população brasileira 2020. Estudos e ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2020.

G.C.K. Lam, D.Y.C. Leung, M. Niewiadomski, S.W. Pang, A.W.F. Lee, P.K.K. Louie, Street-level concentrations of nitrogen dioxide and suspended particulate matter in Hong Kong, Atmospheric Environment, V.33, 1998, Pages 1-11, ISSN 1352-2310.

MALTA, F; COSTA, E; MAGRINI, A. Índice de vulnerabilidade socioambiental: uma proposta metodológica utilizando o caso do Rio de Janeiro, Brasil. Ciência & Saúde Coletiva, 22(12), p. 3933-3944, 2017.

MENDONÇA, F; MONTEIRO, C. A. de F. (Org). Clima urbano. São Paulo: Contexto, 2.ed. 2015, 192 p.

MENDONÇA, F; DANNI-OLIVEIRA, I. M. Climatologia: noções básicas e climas do Brasil. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

Nações Unidas . World Urbanization Prospects, the 2014 Revision. <http://doi.org/10.4054/DemRes.2005.12.9>, 2014.

Natina Yaduma · Mika Kortelainen · Ada Wossink. Estimating Mortality and Economic Costs of Particulate Air Pollution in Developing Countries: The Case of Nigeria. Environ Resource Econ (2013) 54:361–387 DOI 10.1007/s10640-012-9598-7.

Newman, P.W.G, & Kenworthy, J.R. (1989). Gasoline Consumption and Cities: A Comparison of U.S. Cities with a Global Survey. Journal of The American Planning Association, 55 (1), 24-37. <https://doi.org/10.1080/01944368908975398>.

OKE, T. R. Boundary Layer Climates. London: Methuen & Ltd. A. Halsted Press Book, John Wiley & Sons, New York, 1978.

Ozone photochemistry and elevated isoprene during the UK heatwave of august 2003, Atmospheric Environment, Volume 40, Issue 39, 2006, Pages 7598-7613, ISSN 1352-2310, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.06.057>. Paulo: Signus, 2007. 164p

PINTO, F. Geomarketing e SIG como suporte ao planejamento e gestão turística do centro do Rio de Janeiro. 2015. 106 f. Dissertação (Mestrado) - NOVA Information Management School, Universidade Nova de Lisboa, 2015.

Raysoni, A.U.; Pinakana, S.D.; Mendez, E.; Wladyka, D.; Sepielak, K.; Temby, O. A Review of Literature on the Usage of Low-Cost Sensors to Measure Particulate Matter. Earth 2023, 4, 168-186. <https://doi.org/10.3390/earth4010009>.

REIS, A. Análise integrada por geoprocessamento da expansão urbana de Teresina com base no Estatuto da Cidade: estudo de potencialidades, restrições e conflitos de interesses. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

RESENDE, M. MOURA, A. C.; NOGUEIRA, T. Use of GIS in environmental and territorial management of Bom Sucesso -MG: public data at characterization of landscape. In: 5th International Seminar on Environmental Planning and Management, 2012, Brasília. Anais do 5th International Seminar on Environmental Planning and Management. Brasília: Urbenvirion/UnB, p.1-15, 2012.

SAATY, T. Decision making with the analytic hierarchy process. International Journal of Services Sciences, 1, 83. <https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590>

Salat, S. (2009). Energy loads, CO2 emissions and building stocks: morphologies, typologies, energy systems and behaviour. Building Research & Information, 37(5-6), 598-609. <https://doi.org/10.1080/09613210903162126>

SANTOS MELO, I. et al. Adaptação aos impactos das mudanças climáticas na perspectiva do plano diretor da cidade do Recife. Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais, v. 23, p. 1–23, 2022.

Santos, A. L. C.; Santos, F. 2010. Mapeamento das classes de uso e cobertura do solo da bacia hidrográfica do rio Vaza-Barris, Sergipe. Revista Multidisciplinar Da Uniesp: Saber Acadêmico, n °10 – Dez Services Sciences, Vol. 1, No. 1, p.83-98, 2008.

Silva Jr, O. M.; Fuckner, M. A. Avaliação da correlação entre modelo digital de elevação ASTER e carta topográfica para a região de Marabá – Estado do Pará. In: Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação (SIMGEO), 3., Recife. Anais. Recife, 2010. Artigos, p. 27-30. Disponível em: https://www.ufpe.br/cgtg/SIMGEOIII/IIISIMGEO_CD/artigos/Todos_Artigos/R_248.pdf. Acesso em 24.julh.2023

Souza AI, de Siqueira MT, Ferreira ALCG, et al. Geografia da Microcefalia na Era do Zika: Um Estudo da Distribuição Neonatal e Indicadores Socioambientais em Recife, Brasil, 2015-2016. *Relatórios de Saúde Pública*. 2018;133(4):461-471. doi: 10.1177/0033354918777256

Stern N. The economics of climate change. *Climate Stern Rev* 2007. doi: <http://doi.org/9780521700801>.

Su, Y.; Wu, X.; Zhao, Q.; Zhou, D.; Meng, X. Interference of Urban Morphological Parameters in the Spatiotemporal Distribution of PM10 and NO2, Taking Dalian as an Example. *Atmosphere* 2022, 13, 907. <https://doi.org/10.3390/atmos13060907>

VIEIRA, N.R. *Poluição do Ar - Indicadores Ambientais*. Editora E-papers Serviços Editoriais Ltda. 220p. 2009. I.S.B.N.: 9788576502159.

WANDERLEY, L. S. A. et al. As chuvas na cidade do Recife: uma climatologia de extremos. *Revista Brasileira de Climatologia*, Curitiba, v. 22, p. 149-164, jan.-jun.2018.

WINDAHL, E.; BEURS, K. An intercomparison of Landsat landsurface temperature retrieval methods under variable atmospheric conditions using in situ skin temperature. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 51, 2016, p. 11-27, ISSN 1569-8432, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.04.003>.

Worden, HM. Cheng Y, Pfister G, Carmichael GR, Zhang Q, Streets DG, Worden JR. Satellite-based estimates of reduced CO and CO2 emissions due to traffic restrictions during the 2008 Beijing Olympics. *Geophys Res Lett*. 2012; 39(14). doi: 10.1029/2012GL052395.

World Bank. *The Global Health Cost of PM2.5 Air Pollution: A Case for Action Beyond 2021*. International Development in Focus. Washington, DC: World Bank. doi:10.1596/978-1-4648-1816-5.

YNOUE, R.Y.; REBOITA M.S, AMBRIZZI, T., SILVA. *Meteorologia: noções básicas*. São Paulo: Oficina de textos, 184p. 2017.