



INSTITUTO FEDERAL
Piauí



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO PROFISSIONAL EM ANÁLISE E
PLANEJAMENTO ESPACIAL**

RELATÓRIO TÉCNICO

FELIPE RAMOS DANTAS

**ANÁLISE DA ACESSIBILIDADE GEOGRÁFICA ÀS UNIDADES BÁSICAS DE
SAÚDE (UBS) EM TERESINA, PIAUÍ: uma rotina computacional aberta e
reprodutível para o diagnóstico multimodal de iniquidades territoriais em
saúde**

**TERESINA-PI
2026**

FELIPE RAMOS DANTAS

**ANÁLISE DA ACESSIBILIDADE GEOGRÁFICA ÀS UNIDADES BÁSICAS DE
SAÚDE (UBS) EM TERESINA, PIAUÍ: uma rotina computacional aberta e
reprodutível para o diagnóstico multimodal de iniquidades territoriais em
saúde**

Relatório Técnico de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-graduação Profissional em Análise e Planejamento Espacial do Instituto Federal do Piauí, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Análise e Planejamento Espacial.

Área de concentração: Análise e Planejamento Espacial.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Joaquim da Silva

Coorientador: Prof. Dr. Reurysson Chagas de Sousa Morais

**TERESINA-PI
2026**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD

Dantas, Felipe Ramos

D192a Análise da acessibilidade geográfica às Unidades Básicas de Saúde (UBS) em Teresina, Piauí : uma rotina computacional aberta e reprodutível para o diagnóstico multimodal de iniquidades territoriais em saúde / Felipe Ramos Dantas. - 2026.
112 f.: il. color.

Dissertação (Mestrado Profissional em Análise e Planejamento Espacial) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Teresina Central, 2026.

Orientador : Prof Dr. Antonio Joaquim da Silva.

Coorientador : Prof Dr. Reurysson Chagas de Sousa Moraes.

1. Acessibilidade geográfica. 2. Atenção primária à saúde. 3. Desigualdade socioespacial. 4. Método AE2SFCA. 5. Análise espacial. I. Título.

CDD - 910

FELIPE RAMOS DANTAS

ANÁLISE DA ACESSIBILIDADE GEOGRÁFICA ÀS UNIDADES BÁSICAS DE
SAÚDE (UBS) EM TERESINA, PIAUÍ: uma rotina computacional aberta e
reprodutível para o diagnóstico multimodal de iniquidades territoriais em saúde

Relatório Técnico de Mestrado apresentada ao Programa de
Pós-graduação em Profissional em Análise e Planejamento
Espacial do Instituto Federal do Piauí, como parte integrante dos
requisitos para a obtenção do título de Mestre em Análise e
Planejamento Espacial.

Aprovado em: 18 / 08 / 2026.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Antonio Joaquim da Silva (Orientador)
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Dr. Reurysson Chagas de Sousa Moraes (Coorientador)
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Dr. Eduilson Lívio Neves da Costa Carneiro
Universidade Federal do Delta do Parnaíba – UFDPAr

Profa. Dra. Valdira de Caldas Brito Vieira
Instituto Federal do Piauí – IFPI

Dedico este trabalho a minha mãe Aldenir (*in memoriam*), à minha avó materna Maria de Jesus e à minha tia Maria dos Remédios que continuaram minha criação na ausência de minha mãe. À minha amada esposa Mariane Hellen que está ao meu lado desde que eu era um mero estudante de Geoprocessamento e vibra como ninguém a cada vitória minha, que não é só minha, mas dela também. E por fim, aos meus filhos Bernardo Felipe e Laura Hellen que são minha maior motivação para continuar vencendo. Amo todos vocês!

AGRADECIMENTOS

Começo esta seção agradecendo àqueles que me incentivaram, direta e indiretamente, a cursar este programa de pós-graduação. Refiro-me aos meus professores da graduação, com quem pude conviver quase diariamente no ambiente de trabalho enquanto atuei como TAE no IFPI (2014-2024). Agradeço à professora Valdira pelos constantes convites para colaborar em suas pesquisas (oportunidades que abracei e que me permitiram adentrar e tomar gosto pelo mundo da docência, especialmente ao lecionar em suas aulas práticas de QGIS). Ao professor Reurysson, por sempre compartilhar suas experiências de sala de aula, além de seus ensinamentos, métodos e técnicas de pesquisa, sendo um exemplo de busca contínua por atualização tecnológica. E ao professor Daniel, que, de forma semelhante, me convidou para integrar suas pesquisas e me incentivou a crescer profissionalmente.

Um agradecimento especial ao meu orientador, Prof. Dr. Joaquim, que assumiu a responsabilidade de me guiar de forma magnífica durante esses mais de dois anos de curso, e por não permitir que eu desistisse nos vários momentos em que cogitei fazê-lo. Ao meu coorientador, Prof. Dr. Reurysson, pelas ricas e assertivas contribuições nos momentos de orientação.

Agradeço ao Instituto Federal do Piauí (IFPI), Campus Teresina-Central, instituição à qual eu servi por 10 anos como técnico-administrativo, por ter viabilizado esta qualificação. O apoio institucional, concretizado tanto pela oferta de vagas no programa destinadas aos servidores da casa quanto pela fundamental flexibilização da minha jornada de trabalho, foi indispensável para a realização deste mestrado.

À minha querida esposa, Mariane Hellen, que me incentivou e foi meu pilar de apoio durante todo esse período em que estive, de certa forma, mais ausente dos momentos familiares.

Ao meu primogênito, Bernardo Felipe, e à minha caçulinha, Laura Hellen, por terem entendido que, na maioria das vezes, o papai precisava dormir muito tarde ou não podia acompanhá-los ao parquinho ou andar de bicicleta em certos dias.

Por fim, expresso meus sinceros agradecimentos a todos os meus colegas de turma (2024-2026), que ajudaram de alguma forma na concretização deste trabalho e nas atividades das disciplinas.

RESUMO

A Atenção Primária à Saúde constitui a principal porta de entrada do Sistema Único de Saúde (SUS), pressupondo a acessibilidade geográfica das Unidades Básicas de Saúde (UBS). Contudo, métodos tradicionais como o *Two-Step Floating Catchment Area* (2SFCA) apoiam-se em simplificações espaciais que distorcem o diagnóstico, especialmente ao representar a demanda populacional unicamente pelo centroide do setor censitário. Diante disso, esta pesquisa objetivou construir uma rotina computacional aberta e reproduzível em Python para aplicar o método *Areal Enhanced Two-Step Floating Catchment Area* (AE2SFCA) no diagnóstico das desigualdades de acesso às UBS na zona urbana de Teresina-PI. Metodologicamente, a malha viária extraída do *Overture Maps* teve lacunas de classificação preenchidas por uma Rede Neural em Grafos. A rede foi convertida em impedâncias de tempo, incorporando fator de fricção urbana e gerando isócronas multimodais de 10, 20 e 30 minutos. O índice AE2SFCA foi calculado a partir de 81 UBS e 474 equipes de saúde, sendo confrontado com o modelo tradicional e com a renda mediana domiciliar por correlação de *Spearman* e análise espacial bivariada (LISA). Os resultados apontaram uma oferta agregada confortável (5,87 equipes por 10 mil habitantes), porém altamente desigual no espaço. Enquanto a cobertura de 30 minutos alcançou 98,5% da área urbana por automóvel, o alcance pedestre limitou-se a 69,5%. No cenário veicular, a acessibilidade associou-se positivamente à renda ($\rho = +0,438$), concentrando agrupamentos críticos de exclusão na periferia, ao passo que a pé a associação inverteu-se ($\rho = -0,199$), confirmando a hipótese socioterritorial (H_1). Do ponto de vista metodológico, o modelo areal provou-se equivalente ao tradicional no modo motorizado ($\rho = 0,991$), mas corrigiu o diagnóstico equivocado de 64 falsos desertos de saúde no modo pedestre, confirmando a hipótese metodológica (H_2). Conclui-se que a pesquisa cumpre seu duplo propósito ao diagnosticar que a iniquidade de acesso em Teresina é ditada pela dependência do automóvel e fornecer um instrumento aberto, auditável e replicável para o planejamento territorial da saúde pública municipal.

Palavras-chave: Acessibilidade geográfica; Atenção Primária à Saúde; Método AE2SFCA; Desigualdade socioespacial; Análise espacial.

ABSTRACT

Primary Health Care constitutes the main gateway to the Brazilian Unified Health System (SUS), a role that presupposes the geographic accessibility of Basic Health Units (UBS) to the population. However, traditional measurement methods, such as the Two-Step Floating Catchment Area (2SFCA), rely on spatial simplifications that distort the diagnosis, particularly by representing population demand solely through the census tract centroid. In light of this, this research aimed to build an open and reproducible computational routine in Python to apply the Areal Enhanced Two-Step Floating Catchment Area (AE2SFCA) method to diagnose inequalities in access to UBS in the urban area of Teresina, Piauí, Brazil. Methodologically, the road network extracted from Overture Maps had its functional classification gaps filled by a Graph Neural Network. The network was then converted into time impedances, incorporating an urban friction factor to generate multimodal isochrones of 10, 20, and 30 minutes for both car and pedestrian modes. The AE2SFCA index was calculated based on 81 UBS and 474 primary care teams, and was compared with the traditional model and median household income using Spearman's rank correlation and bivariate local spatial association (LISA). The results indicated a comfortable aggregate supply (5.87 teams per 10,000 inhabitants), yet highly unequal in space. While 30-minute physical coverage reached 98.5% of the urban area by car, pedestrian reach was limited to 69.5%. Under the vehicular scenario, accessibility was positively associated with income (Spearman of +0.438), clustering critical exclusion zones in the periphery, whereas on foot this association reversed (−0.199), confirming the socioterritorial hypothesis (H_1). From a methodological perspective, the areal approach proved equivalent to the traditional one in the motorized mode (Spearman of 0.991), but corrected the misdiagnosis of 64 false health deserts in the pedestrian mode, confirming the methodological hypothesis (H_2).

Keywords: Geographic accessibility; Primary Health Care; AE2SFCA method; Socio-spatial inequality; Spatial analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÃO

Quadro 1 – Diferenças fundamentais e objetivos dos métodos 2SFCA e E2SFCA. .	32
Quadro 2 – Bibliotecas Python utilizadas no roteiro computacional e sua finalidade por etapa.	38
Quadro 3 - Detalhamento da base de dados utilizada nesta pesquisa.	41
Quadro 4 - Variáveis socioeconômicas do Censo Demográfico de 2022 (IBGE) utilizadas na pesquisa.....	44
Figura 1 - Ilustrando a diferença entre (a) áreas de captação pontuais e (b) áreas de captação em área.	33
Figura 2 - Mapa de localização da zona urbana de Teresina-PI.	37
Figura 3 - Fluxograma das etapas metodológicas para modelagem da acessibilidade geográfica (AE2SFCA) em Teresina.	40
Figura 4 - Delimitação da área de estudo: limite municipal, zona urbana consolidada e zona de amortecimento (<i>buffer</i>) de 5 km.....	43
Figura 5 – Capacidade das Unidades Básicas de Saúde sobre a densidade populacional por setor censitário, zona urbana de Teresina.....	48
Figura 6 - Malha bruta da Overture Maps por subtipo, área de estudo.....	50
Figura 7 - Distribuição espacial da superfície viária, zona urbana de Teresina.....	52
Figura 8 - Distribuição das velocidades regulamentares.	53
Figura 9 - Distribuições de comprimento das arestas.....	54
Figura 10 - Distribuições da linearidade das arestas.....	54
Figura 11 - Extensão da rede por classe funcional.	55
Figura 12 - Vias sem classificação funcional (alvo da imputação GNN).	56
Figura 13 - Importância relativa das variáveis preditoras na classificação funcional das vias, segundo o modelo Random Forest.....	59
Figura 14 - Frequência das classes funcionais nos segmentos com classificação conhecida (escala logarítmica), zona urbana de Teresina e entorno.....	60
Figura 15 - Efeito da ponderação de classes sobre a imputação: composição das classes previstas e velocidade média estimada, nos cenários com e sem balanceamento.	60
Figura 16 - Desempenho preditivo (F1-score macro e ponderado) dos modelos Random Forest e GraphSAGE no conjunto de teste.....	61
Figura 17 - Distribuição espacial dos segmentos viários reclassificados pela Rede Neural em Grafos, segundo a classe funcional imputada, zona urbana de Teresina.	62
Figura 18 - Número de segmentos corrigidos na etapa de continuidade funcional, por transição de classe (origem → destino).	63
Figura 19 - Exemplo de quebra de continuidade funcional corrigida: trecho anômalo (vermelho) no interior de um corredor contínuo (azul), em visão geral e ampliada.	64

Figura 20 - Velocidade operacional do automóvel após o fator de atrito urbano, zona urbana de Teresina.	67
Figura 21 - Distribuição do tempo de travessia por aresta no modo automóvel (recorte no percentil 99).....	69
Figura 22 – Tempo médio de travessia por aresta, por classe funcional, nos modos automóvel e pedestre.	69
Figura 23 - Áreas de abrangência (isócronas) de 10, 20 e 30 minutos no modo automóvel, por Unidade Básica de Saúde, zona urbana de Teresina.	71
Figura 24 - Áreas de abrangência (isócronas) de 10, 20 e 30 minutos no modo pedestre, por Unidade Básica de Saúde, zona urbana de Teresina.	72
Figura 25 - Distribuição populacional dos setores censitários da zona urbana de Teresina: histograma de frequências e diagrama de caixa.....	76
Figura 26 População residente por setor censitário, classificada e espacializada em quintis, zona urbana de Teresina	77
Figura 27 - Distribuição da renda mediana dos responsáveis pelos domicílios dos setores censitários da zona urbana de Teresina: histograma de frequências e diagrama de caixa.	78
Figura 28 - Renda mediana do responsável por setor censitário, classificada e espacializada em faixas de múltiplos do salário mínimo (2022), zona urbana de Teresina.	79
Figura 29 – (a) distribuição do nº de equipes por UBS; (b) composição por tipo de equipe.....	81
Figura 30 - Áreas de atuação das equipes de Saúde da Família e lacunas de cobertura territorial, zona urbana de Teresina.	83
Figura 31 - Proporção da zona urbana coberta por faixa de tempo de viagem, nos modos automóvel e pedestre.	85
Figura 32 - Acessibilidade às UBS por modo de deslocamento: áreas de abrangência, índice AE2SFCA e desertos de saúde, zona urbana de Teresina.	87
Figura 33 - Setores reclassificados quanto à condição de deserto de saúde entre as abordagens areal (AE2SFCA) e por centroide (E2SFCA), modo automóvel, zona urbana de Teresina.	89
Figura 34 - Diagrama de dispersão entre o índice de acessibilidade no modo automóvel e a renda mediana do responsável por setor censitário, zona urbana de Teresina.	90
Figura 35 - Agrupamentos locais bivariados (LISA) entre a acessibilidade no automóvel e a renda mediana, zona urbana de Teresina.	91
Figura 36 - Agrupamentos locais bivariados (LISA) entre a acessibilidade a pé e a renda mediana, zona urbana de Teresina.	92
Figura 37 - Relação entre os índices de acessibilidade no automóvel e a pé, por setor censitário, zona urbana de Teresina.....	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Integridade das variáveis de interesse da malha viária bruta.	49
Tabela 2 - Superfície da via por classe funcional (% na linha).	51
Tabela 3 - Síntese da malha viária pós-processamento.	57
Tabela 4 - Calibração das velocidades teóricas de projeto frente às medianas regulamentares (<i>Overture Maps</i>), por classe funcional.	65
Tabela 5 - Medidas de posição, variabilidade e forma das variáveis socioeconômicas dos setores censitários da zona urbana de Teresina.	75
Tabela 6 - Síntese da oferta de Atenção Primária (UBS e equipes de APS), área de estudo.	80
Tabela 7 - Oferta de Atenção Primária por regional administrativa de saúde.	82
Tabela 8 – Síntese estatística do índice de acessibilidade AE2SFCA por modo (equipes de APS por 10 mil habitantes) e número de desertos de saúde, zona urbana de Teresina.	87
Tabela 9 - Síntese do teste H_2 (areal $\times$ centroide) por modo: correlação de <i>Spearman</i> , número de desertos de saúde em cada abordagem e setores reclassificados.	89

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1.....	30
Equação 2.....	30
Equação 3.....	31
Equação 4.....	31
Equação 5.....	34
Equação 6.....	34
Equação 7.....	34
Equação 8.....	34
Equação 9,.....	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2SFCA	<i>Two-Step Floating Catchment Area</i> (Área de Captação Flutuante em Duas Etapas)
A2SFCA	<i>Areal Two-Step Floating Catchment Area</i> (Área de Captação Flutuante em Duas Etapas Areal)
AB	Atenção Básica
AE2SFCA	<i>Areal Enhanced Two-Step Floating Catchment Area</i> (Área de Captação Flutuante em Duas Etapas Realçado Areal)
APS	Atenção Primária à Saúde
CNES	Cadastro Nacional de Estabelecimentos de Saúde
DataSUS	Departamento de Informática do Sistema Único de Saúde
E2SFCA	<i>Enhanced Two-Step Floating Catchment Area</i> (Área de Captação Flutuante em Duas Etapas Realçado)
eAP	Equipe de Atenção Primária
EPSCG	European Petroleum Survey Group
eSF	Equipe de Saúde da Família
ETL	<i>Extract, Transform, Load</i> (Extração, Transformação e Carregamento)
FOSS	<i>Free and Open Source Software</i> (Software Livre e de Código Aberto)
GIS	<i>Geographic Information System</i> (Sistema de Informação Geográfica)
GNN	<i>Graph Neural Network</i> (Rede Neural em Grafos)
GraphSAGE	<i>Graph Sample and Aggregate</i>
HTTP	<i>Hypertext Transfer Protocol</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
IQR	Interquartile Range (Intervalo Interquartilico)
KML	<i>Keyhole Markup Language</i>
LISA	<i>Local Indicators of Spatial Association</i> (Indicadores Locais de Associação Espacial)
MAUP	<i>Modifiable Areal Unit Problem</i> (Problema da Unidade de Área Modificável)
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
OMS	Organização Mundial da Saúde
PI	Piauí
PNAB	Política Nacional de Atenção Básica
RAS	Rede de Atenção à Saúde
SAAD	Superintendência das Ações Administrativas Descentralizadas
SEMPHAN	Secretaria Municipal de Planejamento e Coordenação
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SUS	Sistema Único de Saúde
UBS	Unidade Básica de Saúde
UTM	<i>Universal Transverse Mercator</i> (Universal Transversa de Mercator)
WHO	<i>World Health Organization</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

A_i	Índice de acessibilidade geográfica final do setor censitário i
R_j	Razão oferta-demanda calculada para a Unidade Básica de Saúde j
S_j	Oferta ou capacidade instalada da unidade de saúde j , medida pelo número de equipes ativas
P_k/P_i	População residente e demandante na unidade espacial de cálculo k ou i
d_0	Limite máximo de corte ou raio temporal de captação da área de influência (30 minutos)
d_{ij}/d_{kj}	Impedância física ou tempo de viagem entre o setor de demanda (i ou k) e o estabelecimento j
W_l	Peso de decaimento contínuo ou discreto atribuído à faixa de tempo de viagem l
D_l	Zona discreta e concêntrica que delimita uma faixa isócrona de tempo de deslocamento
I_{jk}	Razão ou proporção de sobreposição geométrica areal entre o setor k e a área de captação de j
I_{jkl}	Razão de sobreposição areal entre o setor k e a zona isócrona específica l da unidade j
t_{ij}	Impedância de tempo de percurso calculada para uma aresta ou segmento viário específico
v_{ij}	Velocidade operacional calibrada ou estimada para fluxo em uma aresta da rede
I de Moran	Coeficiente estatístico de autocorrelação espacial univariado ou bivariado
ρ (rho)	Coeficiente de correlação de postos de <i>Spearman</i>
p -valor	Nível de significância estatística de probabilidade para rejeição da hipótese nula

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 OBJETIVO	19
2.1 OBJETIVO GERAL	19
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
3.1 MODELOS DE ACESSO: DIMENSÕES E CONCEITUAÇÃO	20
3.2 INTEGRAÇÃO E RELAÇÃO DA DIMENSÃO “ACESSIBILIDADE GEOGRÁFICA” COM OS MODELOS CONCEITUAIS	26
3.3 MEDINDO O ACESSO POTENCIAL: A NECESSIDADE DE MÉTRICAS ESPACIAIS AVANÇADAS	28
3.4 O MÉTODO AREAL E2SFCA	32
4 METODOLOGIA	35
4.1 ÁREA DE ESTUDO	36
4.2 BASE DE DADOS E PRÉ-PROCESSAMENTO	38
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	75
5.1 CARACTERIZAÇÃO SOCIOECONÔMICA	75
5.2 CARACTERIZAÇÃO DA OFERTA DE ATENÇÃO PRIMÁRIA	80
5.3 CARACTERIZAÇÃO DA REDE VIÁRIA E DA ACESSIBILIDADE FÍSICA	84
5.4 ÍNDICE DE ACESSIBILIDADE AE2SFCA (CARRO E PEDESTRE)	85
5.5 COMPARAÇÃO COM A ABORDAGEM TRADICIONAL (TESTE DE H_2)	88
5.6 DESIGUALDADE SOCIOESPACIAL (TESTE DE H_1)	89
6 CONCLUSÃO	94
7 LIMITAÇÕES DA PESQUISA	95
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS	96
9 REFERÊNCIAS	97
Apêndice A: 01.1 (limites IBGE + censo)	102
Apêndice B: 01.2 (Overture)	104
Apêndice C: 01.3 (UBS/oferta)	105
Apêndice D: 02.1 (limpeza/topologia)	106
Apêndice E: 02.2 (GNN)	107
Apêndice F: 03.1 (impedâncias)	109
Apêndice G: 04.1 (isócronas)	110
Apêndice H: 05.1 (índice AE2SFCA + E2SFCA)	111
Apêndice I: 06.1 (testes H_1/H_2)	112

1 INTRODUÇÃO

O debate sobre acesso universal à saúde tem como marco histórico a Declaração de Alma-Ata, aprovada em 1978 na cidade de Alma-Ata (atualmente Almaty) no Cazaquistão pelos países membros da Organização Mundial de Saúde, OMS (WHO, 2018). Nessa declaração ficaram estabelecidos os princípios fundamentais da Atenção Primária à Saúde (APS) os quais enfatizavam a necessidade de reduzir as disparidades econômicas, sociais e geográficas entre países desenvolvidos e em desenvolvimento, além da formulação de políticas públicas nacionais e estratégicas para garantir uma APS integral e um acesso universal à saúde (Giovannella *et al.*, 2019).

Quarenta anos depois daquele marco histórico, os princípios de Alma-Ata foram reafirmados na Declaração de Astana, na então capital do Cazaquistão, Astana, pela OMS. Também foram reafirmados esforços para atingir a meta global 3.8 dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), o qual visa garantir a cobertura universal de saúde, incluindo: a proteção contra risco financeiro, acesso a serviços essenciais de qualidade e disponibilidade de medicamentos e vacinas seguros, eficazes, de qualidade e acessíveis a todos (WHO, 2015, 2018).

No Brasil, a Constituição Federal de 1988 incorporou princípios alinhados à Declaração de Alma-Ata ao definir a saúde como um direito de todos e um dever do Estado e criar o sistema público nacional de saúde, o Sistema Único de Saúde (SUS). Financiado por tributos gerais, o SUS busca garantir a universalidade, integralidade, participação social e equidade de acesso, abrangendo desde atendimentos básicos, como a aferição da pressão arterial, até procedimentos de alta complexidade, como transplante de órgãos (Brasil, 2024). Atualmente, mais de 70% da população brasileira depende exclusivamente do SUS para acessar assistência à saúde, o que bem se expressa no ideário de APS contida na Declaração de Alma-Ata (IPEA, 2019).

De acordo com a Política Nacional de Atenção Básica (PNAB), no âmbito do SUS, todos os estabelecimentos de saúde que prestem ações e serviços de Atenção Básica serão denominados Unidade Básica de Saúde (UBS) (Brasil, 2017). Vale ressaltar, que a PNAB considera os termos Atenção Básica (AB) e Atenção Primária à Saúde (APS) como equivalentes. Ela ainda esclarece em seu Art. 2º, parágrafo 1º que “a Atenção Básica é a principal porta de entrada e centro de comunicação da

Rede de Atenção à Saúde (RAS), coordenadora do cuidado e ordenadora das ações e serviços disponibilizados na rede”.

Observa-se que a definição da PNAB não é meramente burocrática, pois estabelece a função estratégica da UBS no território. Ao designá-la como a “principal porta de entrada”, a PNAB assume que esta porta é geograficamente acessível a todos os cidadãos. No entanto, uma porta fisicamente distante ou de difícil alcance deixa de cumprir sua função primária, excluindo potenciais usuários antes mesmo que possam ingressar no sistema. Além disso, ao posicionar a UBS como “centro de comunicação” e “coordenadora do cuidado”, a PNAB a define como o nó central que conecta o paciente a toda a Rede de Atenção à Saúde (RAS). Uma falha no acesso a este nó inicial, portanto, não apenas impede um atendimento primário, mas compromete a jornada do paciente por todo o sistema, fragmentando o cuidado e podendo levar à sobrecarga de serviços de emergência.

Desta forma, analisar a acessibilidade geográfica às UBS transcende a simples medição de distâncias, torna-se uma auditoria da efetividade espacial de um dos pilares fundamentais do Sistema Único de Saúde.

A relevância desta pesquisa é dupla: social e tecnológica. Socialmente, realiza uma auditoria espacial da efetividade do acesso ao SUS em Teresina - PI, preenchendo uma lacuna na literatura local, uma vez que estudos anteriores sobre acessibilidade geográfica à saúde nesta capital não adotaram métricas espacialmente explícitas baseadas em redes viárias reais. Tecnicamente, justifica-se pela necessidade de instrumentalizar o planejamento e a gestão pública com ferramentas de Geointeligência.

Nesse sentido, produz-se uma rotina computacional reprodutível, disponibilizada em repositório público na forma de cadernos de código (*notebooks*) Python documentados, de modo que o procedimento aqui desenvolvido possa ser auditado, adaptado e replicado por diferentes interessados: da gestão pública e do planejamento urbano à academia e ao controle social, em Teresina ou em outros municípios.

No campo da mensuração da acessibilidade geográfica, os métodos tradicionais, como o *Two-Step Floating Catchment Area* (2SFCA), proposto por Radke e Mu (2000) e aprimorado por Luo e Wang (2003), são amplamente adotados na literatura, mas reconhecidamente limitados por duas simplificações estruturais.

A primeira é o tratamento igualitário do acesso dentro de uma mesma área de captação, ignorando que a atratividade de um serviço de saúde diminui progressivamente com o aumento da distância. A segunda é a representação da demanda populacional como concentrada em centroides de setores censitários, o que gera distorções espaciais (Michels *et al.*, 2024). No sistema estatístico nacional, o setor censitário constitui a menor unidade territorial de análise definida pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). A redução dessa unidade poligonal a um ponto central desconsidera a distribuição espacial interna da população, acarretando imprecisões geométricas, principalmente em áreas periféricas onde os polígonos tendem a possuir maior extensão territorial.

Cada limitação foi tratada por um aprimoramento distinto, detalhados na fundamentação teórica: a primeira pelo Enhanced 2SFCA (E2SFCA), que introduziu pesos de decaimento por faixas de tempo de viagem (Luo; Qi, 2009); a segunda pela abordagem areal, que substitui o centroide pela área da unidade (Michels *et al.*, 2024).

Esta pesquisa adota o método *Areal Enhanced Two-Step Floating Catchment Area* (AE2SFCA), que reúne os dois aprimoramentos, o decaimento pela distância e a correção areal, sendo esta última a contribuição específica de Michels *et al.* (2024).

No contexto desta pesquisa, adota-se o termo "desertos de saúde" de forma operacional para denominar as zonas urbanas identificadas com índice de acessibilidade AE2SFCA abaixo de um limiar crítico definido metodologicamente. Embora o termo careça de uma definição formal e globalmente consolidada na literatura internacional (Brînzac *et al.*, 2023), sua utilização neste trabalho é delimitada à dimensão geográfica do acesso, excluindo barreiras financeiras ou socioculturais. Essa delimitação é transparente e defensável metodologicamente: a ausência de uma definição operacional universalmente aceita para o contexto do SUS e da APS constitui, em si, uma lacuna que a presente rotina computacional busca parcialmente contribuir para preencher, ao oferecer um instrumento reprodutível para a identificação e quantificação desses territórios em municípios brasileiros.

Diante desse cenário, define-se o seguinte problema de pesquisa: quais são os níveis atuais de acessibilidade geográfica às UBS em Teresina, considerando os distintos modais de deslocamento – veicular e a pé? De modo complementar, busca-se avaliar se esse diagnóstico pode subsidiar, de forma replicável, a gestão territorial da saúde pública no município.

Para responder diretamente à pergunta de pesquisa, este estudo formula duas hipóteses científicas complementares e testáveis, que atacam, respectivamente, as dimensões geométricas e socioterritorial do diagnóstico de acesso.

A primeira hipótese (H_1), de natureza socioterritorial, sustenta que a acessibilidade às UBS em Teresina não é espacialmente uniforme, mas condicionada pelo modal de deslocamento: enquanto a infraestrutura viária favorece a acessibilidade motorizada das populações de maior renda situadas em áreas centrais, ela expõe a severa exclusão geográfica das populações de menor renda dependentes do deslocamento a pé, sobretudo nas áreas periféricas.

A segunda hipótese (H_2), de natureza metodológica, sustenta que a aplicação do método AE2SFCA, ancorado na representação areal da demanda e sensível à diferenciação modal (veicular e a pé), corrige erros sistemáticos de classificação espacial presentes nas abordagens tradicionais de representação pontual (falsos desertos de saúde e falsas coberturas) e qualifica a captação das iniquidades descritas em H_1 , constituindo-se, assim, em instrumento replicável e reprodutível capaz de subsidiar a gestão territorial da saúde pública.

Nesse contexto, torna-se primordial aprofundar a análise de como os serviços de saúde e a população estão distribuídos dentro do território, a fim de mapear as áreas onde potenciais usuários do sistema enfrentam as maiores dificuldades de acesso. Ressalta-se que a UBS é a porta de entrada para todo o sistema público de saúde, desempenhando papel não apenas na promoção da saúde em geral, mas também no contexto de crises sanitárias, como da COVID-19 (Cucinotta; Vanelli, 2020). A partir dessa perspectiva, pode-se mensurar a acessibilidade geográfica (componente central para estudos urbanos, regionais e de transporte), além de ser fundamental no alcance da cobertura universal de saúde e servir de subsídio para formulações de políticas públicas, campanhas de vacinação, alocação de recursos, e outros (Fonseca *et al.*, 2022; Macharia; Banke-Thomas; Beňová, 2023).

Como resposta prática a esse desafio científico e materialização do caráter aplicado desta pesquisa, desenvolveu-se como produto técnico uma rotina computacional modularizada, aberta e reprodutível para a análise de acessibilidade geográfica. Esse pipeline de geoprocessamento foi estruturado na linguagem Python e implementado em cadernos de código interativos (*Jupyter Notebooks*) amplamente documentados. Hospedado em um repositório público no GitHub, o produto

disponibiliza não apenas o código-fonte, mas também as bases de dados brutas e processadas, garantindo a transparência e a auditabilidade de todas as etapas de cálculo.

A relevância tecnológica desse produto reside em sua independência de sistemas comerciais. Ao integrar ferramentas de código aberto como *GeoPandas*, *city2graph* e algoritmos de aprendizado em grafos, a rotina democratiza o acesso à Geointeligência para o planejamento urbano. Isso viabiliza que municípios de médio e pequeno porte realizem diagnósticos territoriais complexos de suas redes de saúde sem a necessidade de adquirir licenças onerosas de *softwares* de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) proprietários.

No que tange à sua utilidade prática para o planejamento do Sistema Único de Saúde (SUS), o produto técnico opera em três frentes de intervenção. Primeiro, serve como um simulador locacional que apoia a tomada de decisão, permitindo que gestores testem o impacto de novas Unidades Básicas de Saúde (UBS) ou do remanejamento de equipes antes da realização de investimentos físicos. Segundo, sua estrutura flexível permite o monitoramento temporal contínuo da acessibilidade à medida que novas bases de dados do Censo Demográfico ou malhas de transporte são atualizadas. Por fim, sua arquitetura modular foi projetada para ser escalável, permitindo que técnicos de qualquer outro município brasileiro repliquem o diagnóstico em seus próprios territórios, bastando alimentar o algoritmo com os dados de suas respectivas redes locais.

2 OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a acessibilidade geográfica às Unidades Básicas de Saúde (UBS) na zona urbana de Teresina, considerando os modais de deslocamento veicular e a pé, mediante a aplicação do método *Areal Enhanced Two-Step Floating Catchment Area* (AE2SFCA) implementado em uma rotina computacional aberta, automatizada e reproduzível, estruturada em cadernos de código (*notebooks*) Python documentados e disponibilizada como ferramenta replicável para a identificação de iniquidades territoriais em saúde.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Implementar e documentar uma rotina computacional em Python que automatize as etapas de aquisição de dados viários (*Overture Maps*), imputação de classes funcionais via Rede Neural em Grafos (GNN), cálculo de impedâncias e aplicação do método AE2SFCA, garantindo a reprodutibilidade e a auditabilidade do processo.
2. Mensurar e cartografar o índice de acessibilidade AE2SFCA para os setores censitários da zona urbana de Teresina, identificando e caracterizando as zonas classificadas operacionalmente como "desertos de saúde".
3. Analisar a correlação espacial entre o índice de acessibilidade calculado pela aplicação do AE2SFCA e a renda mediana dos setores censitários, verificando empiricamente a hipótese de iniquidade territorial (H_1).
4. Comparar os resultados da aplicação do AE2SFCA com os do método E2SFCA tradicional, identificando e quantificando as diferenças no diagnóstico da acessibilidade entre as duas abordagens na zona urbana de Teresina, em verificação à hipótese metodológica (H_2).
5. Disponibilizar o código-fonte, os dados processados e a documentação da rotina computacional em repositório público (GitHub), com instruções que permitam sua replicação e adaptação por diferentes interessados - da gestão pública e do planejamento urbano à academia -, inclusive por usuários sem expertise computacional avançada.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 MODELOS DE ACESSO: DIMENSÕES E CONCEITUAÇÃO

Apesar de sua importância central, o conceito de “acesso” é inerentemente complexo, multifacetado e frequentemente não é claramente definido na literatura e nas políticas, o que gera ambiguidades. Essa complexidade decorre do fato de que o acesso transcende a mera disponibilidade ou oferta de serviços, abrangendo também uma série de barreiras financeiras, organizacionais, sociais e culturais que podem limitar a utilização. A confusão é agravada, pois o termo “acesso” pode se referir tanto

ao potencial de uso dos serviços quanto ao ato de utilizá-los. Essa evolução conceitual reflete o reconhecimento crescente de que o acesso é um fenômeno dinâmico, influenciado pela interação entre as características do sistema de saúde e da população.

No contexto da Atenção Primária à Saúde (APS), em especial das Unidades Básicas de Saúde (UBS) no Brasil, essa discussão se torna ainda mais crítica. Em um sistema universal como o SUS, que visa garantir o acesso como um direito constitucional, compreender as barreiras que persistem para além da gratuidade do serviço é fundamental. Portanto, a análise de modelos teóricos internacionais se faz necessária não para uma aplicação direta, mas para uma adaptação crítica que ilumine as particularidades do acesso no cenário brasileiro.

Os modelos conceituais de Penchansky e Thomas (1981) e Gulliford *et al.* (2002) têm sido amplamente aplicados em estudos de acessibilidade à saúde, particularmente no contexto da APS. Essas aplicações demonstram a utilidade dos *frameworks* para diagnosticar barreiras e informar intervenções, embora também revelem a necessidade de adaptação e flexibilidade na sua utilização.

O modelo de acessibilidade proposto por Penchansky e Thomas em 1981 representou um marco significativo na conceituação do acesso aos serviços de saúde. Eles definiram o acesso como o “grau de ajuste” (tradução livre de: *degree of fit*) entre as características e expectativas dos provedores de saúde e dos clientes (Penchansky; Thomas, 1981). A premissa central é que, quanto maior a adequação entre as necessidades do usuário e as características do serviço, maior será o acesso efetivo. Esta teoria foi desenvolvida com o intuito de melhorar a definição e a medição do acesso, sendo influenciada por modelos de utilização de serviços de saúde, como os propostos por Andersen e outros teóricos (Saurman, 2016).

Segundo Penchansky e Thomas (1981), o acesso exerce influência sobre os consumidores e os sistemas de saúde de três maneiras distintas: no uso do serviço, na satisfação do consumidor e na prática do sistema. Eles agruparam as características que determinam o ajuste entre provedor e o cliente em cinco dimensões interconectadas, conhecidas como os “Cinco As” do acesso:

- i. Disponibilidade (tradução livre de *Availability*): esta dimensão refere-se à relação entre o volume e o tipo de serviço de saúde e recurso (como pessoal qualificado, tecnologia e instalações) que o provedor possui e o volume e os

tipos de necessidades dos clientes e das comunidades que ele serve. A mera presença de instalações não é uma medida adequada de disponibilidade, onde o aspecto mais importante é a adequação da oferta à demanda real da população.

- ii. **Acessibilidade** (tradução livre de *Accessibility*): esta dimensão é explicitamente definida como acessibilidade geográfica, pois ela é determinada pela facilidade com que o cliente pode fisicamente alcançar a localização do provedor em termos de tempo e distância. A distância para uma unidade de saúde é um exemplo prático de barreira de acessibilidade.
- iii. **Acomodação** (tradução livre de *Accommodation*): esta dimensão reflete o grau em que a operação do provedor é organizada de maneira a atender às restrições e preferências do cliente. As principais preocupações incluem os horários de funcionamento, a gestão das comunicações telefônicas, os sistemas de encaminhamento ou agendamento de consultas, e a capacidade do cliente de receber atendimento sem agendamento prévio. Além disso, a adequação da estrutura física das instalações, como o acesso para cadeiras de rodas, também é um fator relevante. No contexto do SUS, esta dimensão se conecta diretamente a desafios crônicos como as longas filas de espera e a dificuldade na marcação de consultas, que funcionam como barreiras organizacionais significativas mesmo quando o serviço está geograficamente próximo.
- iv. **Capacidade de Pagamento** (tradução livre de *Affordability*): esta dimensão é determinada pela relação entre os custos cobrados pelo provedor e a capacidade e disposição do cliente de pagar pelos serviços. Isso engloba os custos diretos tanto para o provedor quanto para o consumidor, incluindo taxas de serviços, coparticipações e outros custos incidentais. Em um sistema de saúde universal e gratuito como o SUS, a dimensão da Capacidade de Pagamento sofre uma ressignificação crucial. A barreira deixa de ser o custo direto da consulta ou do procedimento e passa a residir nos custos indiretos associados à busca pelo cuidado. A dificuldade em obter o dinheiro para o transporte até a UBS, a perda de um dia de trabalho (especialmente para trabalhadores informais), ou mesmo o custo de medicamentos não disponíveis na farmácia da unidade são exemplos

práticos de como a “capacidade de pagamento” permanece como uma barreira relevante no Brasil, impactando desproporcionalmente as populações mais vulneráveis.

- v. Aceitabilidade (tradução livre de *Acceptability*): esta dimensão captura o grau de conforto do cliente com as características mais inerentes do provedor, e vice-versa. Tais características incluem a idade, sexo, classe social e etnia tanto do provedor quanto do cliente, em como o diagnóstico do cliente e o tipo de cobertura de seguro. A aceitabilidade também se refere a forma como o serviço responde às atitudes do provedor e do consumidor em relação às características do serviço e a quaisquer preocupações sociais ou culturais. Exemplo é a disposição de um paciente em consultar um médico do sexo feminino, por exemplo, pode determinar a aceitabilidade de um serviço.

A interconexão dessas dimensões é crucial, pois elas formam, segundo McLaughlin e Wyszewianski (2002, p. 1442), uma “cadeia que não é mais forte do que seu elo mais fraco”, isto é, a melhoria em uma única dimensão, como a capacidade de pagamento por meio de seguro de saúde, não resultará em uma melhoria significativa do acesso e da utilização se as outras quatro dimensões não forem igualmente abordadas. Assim, concentrar-se em apenas uma dimensão pode resultar em investimentos ineficientes e na perpetuação das desigualdades em saúde.

No entanto, apesar de sua ampla utilização na pesquisa de acesso à saúde esse modelo tem sido objeto de críticas e propostas de extensão. Uma observação comum é que as dimensões nem sempre são aplicadas de forma consistente com sua conceituação original, podendo ser omitidas, expandidas, rotuladas incorretamente ou combinadas em diferentes estudos (Saurman, 2016). A omissão ocorre quando apenas algumas dimensões são consideradas, como o uso exclusivo de disponibilidade, acessibilidade e capacidade de pagamento para determinar o acesso. A expansão envolve a divisão de dimensões individuais em seus componentes, como a subdivisão da acessibilidade em geográfica e pontualidade. A rotulagem incorreta acontece quando uma definição errada é aplicada a um termo, por exemplo, ao sugerir que a localização é um componente da disponibilidade. A combinação se manifesta quando duas dimensões individuais, como a disponibilidade e adequação, são apresentadas como uma única (Saurman, 2016).

Uma crítica notável e uma proposta de extensão significava ao modelo é a adição de uma sexta dimensão: a Consciência (tradução livre de *Awareness*) (Saurman, 2016). Argumenta-se que a consciência é parte integrante do acesso, pois um serviço deve manter a população informada por meio de comunicação e estratégias de informação eficazes com os usuários relevantes (clínicos, pacientes e a comunidade em geral), considerando o contexto e a alfabetização em saúde.

Essa dimensão é particularmente relevante em comunidades rurais e remotas, onde a falta de conhecimento sobre a existência de um serviço ou seus objetivos pode ser uma barreira significativa ao acesso como observado na cidade de Herat, Afeganistão, onde os autores realizaram uma pesquisa transversal e utilizaram um questionário modificado baseado na teoria de acesso de Penchansky e Thomas para investigar o nível de percepção de acesso aos serviços de saúde por parte dos clientes em centros de saúde. O questionário modificado avaliou as cinco dimensões originais e incorporou a dimensão “consciência”. Os resultados indicaram que essa dimensão obteve a percepção mais alta entre os clientes, reforçando sua importância (Satarzadeh *et al.*, 2025; Saurman, 2016).

Já o modelo de acessibilidade proposto por Gulliford *et al.* (2002), conceitua o acesso como um conceito complexo e multidimensional, que exige avaliação em pelo menos quatro aspectos distintos:

- i. Disponibilidade de serviço: esta dimensão foca na existência de uma oferta adequada de serviços de saúde e recursos necessários. A presença de uma oferta suficiente cria a oportunidade para que a população obtenha cuidados de saúde quando estes são desejados ou necessários.
- ii. Obtenção de acesso: esta dimensão aborda a utilização efetiva dos serviços e as diversas barreiras que podem limitar essa utilização. Vai além da simples presença da oferta e considera o “grau de ajuste” entre o cliente e os serviços, ou seja, quão bem os serviços e os clientes se correspondem.
- iii. Relevância e efetividade do tratamento: esta dimensão enfatiza que o propósito último do acesso aos cuidados de saúde não é meramente a utilização dos serviços, mas sim a promoção da saúde e a obtenção de resultados de saúde satisfatórios.
- iv. Equidade na provisão de cuidados de saúde: associado à justiça social, esta dimensão é definida como “justiça no acesso” para grupos com

necessidades equivalentes. A equidade de acesso pode ser mensurada em termos de disponibilidade, utilização ou resultados dos serviços, e requer a consideração tanto das dimensões horizontais (tratamento igual para necessidades iguais) quanto verticais (tratamento diferenciado para necessidades diferentes, a fim de alcançar a igualdade de resultados) da equidade. A consideração da disponibilidade de serviços e das barreiras ao acesso mostra-se fundamental quando contextualizada à luz das diferentes perspectivas, necessidades de saúde e contextos materiais e culturais de diversos grupos na sociedade

A essência desse modelo reside na distinção fundamental entre “ter acesso” e “obter acesso”. “Ter acesso” refere-se à oportunidade potencial de utilizar serviços de saúde, que surge da mera disponibilidade desses serviços. Por outro lado, “obter acesso” implica a utilização real dos serviços, e isso depende da capacidade dos indivíduos de superar uma série de barreiras, sejam elas financeiras, organizacionais ou socioculturais (Higgs, 2004).

O modelo de Gulliford *et al.* (2002) é frequentemente referenciado em estudos que buscam uma compreensão aprofundada da complexidade do acesso, especialmente em relação a barreiras e equidade.

Estudo realizado no Reino Unido em 2007 sobre acesso a serviços de saúde para pessoas com deficiência de aprendizagem utilizou a definição de acesso de Gulliford (Alborz; McNally; Glendinning, 2005). A pesquisa aplicou a distinção entre “ter acesso” e “obter acesso” e os resultados revelaram altos níveis de necessidades de saúde não atendidas (72% a 94%), dificuldade na identificação de necessidades (baixa consciência corporal, respostas de dor deprimidas), habilidades de comunicação limitadas e o papel central, mas por vezes de barreira, dos cuidadores (barreiras culturais entre minorias étnicas também foram observadas). Este estudo demonstrou como o modelo de Gulliford pode ser aplicado para mapear barreiras complexas e multifacetadas que impedem a “obtenção de acesso” para populações vulneráveis, indo além da mera disponibilidade de serviços.

No contexto da África Subsaariana, um estudo transversal (com dados de 2006-2018) em 36 países avaliou os determinantes do acesso à saúde entre mulheres em idade reprodutiva (Tessema *et al.*, 2022). Este estudo, embora não explicitamente usando o modelo de Gulliford, ilustra a relevância de suas dimensões (disponibilidade,

obtenção de acesso, equidade) em contexto de saúde pública global, destacando como fatores socioeconômicos e geográficos continuam a ser barreiras significativas.

A persistência das barreiras fundamentais na APS é um achado consistente. Os estudos de casos, tanto para Penchansky quanto para Gulliford, consistentemente apontam para barreiras como custo (capacidade de pagamento), distância (acessibilidade geográfica), tempo de espera (acomodação/disponibilidade) e fatores socioculturais/linguísticos (aceitabilidade/obtenção de acesso) como fatores persistentes no acesso à APS, mesmo em diferentes contextos geográficos e socioeconômicos. Isso sugere que, apesar das décadas de pesquisas e intervenções, as barreiras fundamentais ao acesso à saúde permanecem.

Os modelos conceituais continuam altamente relevantes para diagnosticar esses problemas, mas a implementação de soluções eficazes requer um compromisso contínuo e adaptado às realidades locais, reconhecendo a complexidade das interações entre as dimensões.

A necessidade de modelos adaptativos e integrados para a APS é evidente. A modificação do questionário de Penchansky e Thomas para incluir “consciência” no estudo de Herat (Satarzadeh *et al.*, 2025) e a abordagem multifacetada dos estudos que se alinham com Gulliford (Shrestha, 2010) demonstram que os modelos conceituais precisam ser adaptados e, por vezes, expandidos para capturar a complexidade do acesso na prática. A APS, como “primeiro ponto de contato” e “porta de entrada” para o sistema de saúde, exige uma compreensão holística das barreiras.

3.2 INTEGRAÇÃO E RELAÇÃO DA DIMENSÃO “ACESSIBILIDADE GEOGRÁFICA” COM OS MODELOS CONCEITUAIS

A dimensão da acessibilidade geográfica é um componente intrínseco e fundamental na compreensão do acesso aos serviços de saúde. No entanto, seu enquadramento varia de maneira significativa entre os principais modelos teóricos, refletindo diferentes ênfases na complexa relação entre espaço, oferta de serviços e o usuário.

Enquanto o modelo de Penchansky e Thomas (1981) estrutura-se em dimensões taxonômicas explícitas, a abordagem de Gulliford *et al.* (2002) adota uma perspectiva integrada e processual. No modelo clássico dos “Cinco As”, desenvolvido pelos primeiros autores, a “Acessibilidade” física é individualizada como uma barreira

de caráter eminentemente geográfico (Ferreira; Raffo, 2012; Penchansky; Thomas, 1981). Esta dimensão quantifica a facilidade com que o usuário alcança o provedor, sendo determinada por fatores como o tempo de deslocamento, a distância e os custos de viagem. Assim, na taxonomia tradicional, o componente espacial figura como uma categoria discreta, embora interconectada às demais condições de ajuste do sistema de saúde.

Por outro lado, a dimensão “Disponibilidade” avalia a suficiência de recursos, relacionando quantitativamente a capacidade instalada dos serviços (como equipes ativas e leitos) com o volume da demanda local (Penchansky; Thomas, 1981). É precisamente da articulação simultânea dessas duas dimensões – a proximidade física (acessibilidade) e a suficiência de recursos (disponibilidade) – que emerge o conceito de “acessibilidade espacial” (*spatial accessibility* - SA) (Bryant Jr; Delamater, 2019; Guagliardo, 2004). Esta métrica integrada configura-se, portanto, como uma medida robusta do potencial de entrega de um serviço (cuidados de saúde, por exemplo), sintetizando a capacidade de oferta em relação à dispersão geográfica da população no território

De maneira distinta, no modelo de Gulliford a acessibilidade geográfica não é apresentada como uma dimensão isolada. Em vez disso, ela é um componente transversal e implícito que condiciona as outras dimensões. A “Disponibilidade de Serviço”, por exemplo, implica que os serviços devem estar no “lugar e tempo certos”, o que possui um forte e inegável componente geográfico. Mais importante, na dimensão “Obtenção de Acesso”, a acessibilidade física é identificada como uma das barreiras centrais que os indivíduos precisam superar para que o acesso potencial se converta em acesso realizado, acompanhado de barreiras financeiras, organizacionais e culturais (Higgs, 2004).

Essa diferença de abordagem é fundamental. A distinção de Gulliford entre “ter acesso” (a existência de um serviço fisicamente acessível) e “obter acesso” (a utilização bem-sucedida do serviço) coloca a geografia como um pré-requisito para o primeiro e uma barreira a ser superada para o segundo (Higgs; Langford; Fry, 2010). Fica evidente que a localização de uma unidade de saúde impacta o acesso de forma interdependente com os padrões de assentamento da população e, crucialmente, com sua capacidade de se deslocar até o serviço (Levesque; Harris; Russell, 2013).

Portanto, embora ambos os modelos reconheçam a importância da geografia, a abordagem de Gulliford oferece um arcabouço mais dinâmico para entender como as barreiras espaciais interagem com outras vulnerabilidades. A importância da distância como barreira ao acesso à saúde tem sido reconhecida há muito tempo, remontando ao século XIX nos EUA. Contudo, em áreas urbanas densamente povoadas, as medidas tradicionais, como a distância ao provedor mais próximo, perdem validade, exigindo o desenvolvimento de metodologias mais refinadas para capturar essa complexa interação entre espaço, serviço e população (Guagliardo, 2004).

3.3 MEDINDO O ACESSO POTENCIAL: A NECESSIDADE DE MÉTRICAS ESPACIAIS AVANÇADAS

A avaliação do acesso potencial, ou seja, a oportunidade que um indivíduo tem de utilizar um serviço de saúde, é primordialmente realizada por meio de métricas geográficas e espaciais. Essas métricas buscam quantificar a relação entre a distribuição e as características dos serviços (oferta) e a dos consumidores (demanda), considerando a capacidade de superação da distância entre eles. A medição dessa acessibilidade espacial tem se beneficiado imensamente do avanço das geotecnologias. Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) são ferramentas consolidadas e essenciais para essa tarefa, pois contêm os componentes necessários para a captura, armazenamento, gestão e, principalmente, a manipulação de dados espaciais e seus atributos (Guagliardo, 2004).

Contudo, para responder a perguntas complexas sobre as causas das desigualdades no acesso, métodos simples de medição são insuficientes. Métricas tradicionais, como a impedância de viagem ao provedor mais próximo ou a simples contagem de serviços dentro de uma área administrativa (bairro, município e outras áreas), podem mascarar desigualdades importantes, especialmente em áreas urbanas complexas onde a população pode interagir com múltiplos serviços e a competição por eles é um fator relevante. Diante dessa limitação, a literatura tem avançado para modelos mais sofisticados que consideram a interação entre oferta e demanda de forma mais realista (Pereira; Herszenhut, 2023; Wood *et al.*, 2023).

A literatura sobre acessibilidade espacial documenta uma clara evolução metodológica. As abordagens mais simples são as razões entre população e

provedores dentro de limites geográficos definidos (por exemplo, médicos por habitante em um município). Embora intuitivas e fáceis de calcular e comunicar para gestores, essas métricas são não-espaciais, ignorando completamente a distância, o tempo de viagem e a mobilidade da população entre as áreas (Ferreira; Raffo, 2012; McGrail; Humphreys, 2009).

Uma evolução direta são os modelos baseados na distância ou tempo de viagem ao serviço mais próximo. Apesar de simples, essa abordagem apresenta duas falhas críticas: primeiro, ela não considera a capacidade do serviço ou o tamanho da população que ele atende, assumindo uma oferta ilimitada; segundo, ignora o comportamento real dos pacientes, que frequentemente não escolhem o serviço mais próximo, mas sim um que ofereça melhor qualidade percebida ou outras conveniências (Ferreira; Raffo, 2012; McGrail; Humphreys, 2009).

Para resolver essas limitações, o Modelo de Gravidade surgiu como uma alternativa mais robusta, pois considera simultaneamente a proximidade, a capacidade da oferta e a demanda da população (Guagliardo, 2004). Ele assume que a atratividade de um serviço diminui com a distância. Contudo, a principal crítica a este modelo é a dificuldade em definir sua função de decaimento pela distância, o que frequentemente leva a resultados muito suavizados no espaço, criando padrões de acessibilidade concêntricos que nem sempre refletem a realidade, especialmente em áreas com poucos serviços (Ferreira; Raffo, 2012; McGrail; Humphreys, 2009).

Para superar as falhas de todos esses métodos anteriores, foram desenvolvidas abordagens como a da área de captação flutuante de duas etapas (2SFCA) (Luo, 2014).

O método 2SFCA é amplamente considerado uma ferramenta robusta para medir o acesso espacial, pois ele supera duas limitações centrais dos métodos mais simples: ele considera a disponibilidade de serviços para além das fronteiras administrativas (a população de uma área pode usar o serviço da área vizinha) e leva em conta a demanda populacional na área de influência de cada serviço, evitando a suposição de que a oferta é ilimitada (Krügel; Mäs, 2023).

O método 2SFCA utiliza dois passos conceituais simples para medir o acesso a recursos:

- i. Primeira etapa (Cálculo da Razão Oferta-Demanda na Oferta): primeiramente, determina-se uma área de alcance (área de captação) para

cada local de oferta j (por exemplo, UBS) baseada em um limite de distância ou tempo de viagem (d_0). Em seguida, calcula-se a razão/proporção entre a capacidade de oferta (S_j) e a população total (P_k) que reside dentro do seu alcance.

$$R_j = \frac{S_j}{\sum_{k \in \{d_{kj} \leq d_0\}} P_k} \quad \text{Equação 1}$$

onde:

- R_j = razão oferta-demanda para o local j .
 - S_j = oferta no local j .
 - P_k = população na localização k .
 - d_{kj} = distância/tempo de viagem entre o local k e o local j .
 - d_0 = limite máximo de distância/tempo de viagem.
- ii. Segunda etapa (Acessibilidade Final): na segunda etapa, a perspectiva muda para o lado da demanda. Para cada localização de população i (por exemplo, centroide de um bairro), a acessibilidade (A_i) é calculada como a soma de todas as razões (R_j) das unidades de serviços que a população consegue alcançar, ou seja, que estão dentro do limite d_0 da localização i .

$$A_i = \sum_{j \in \{d_{ij} \leq d_0\}} R_j \quad \text{Equação 2}$$

onde:

- A_i = acessibilidade no local da população i .
- R_j = razão oferta-demanda calculada na etapa 1.
- d_{ij} = distância/tempo da viagem entre o local i e o local j .
- d_0 = limite máximo de distância/tempo de viagem.

Para uma pesquisa com foco na análise de desigualdades como esta, no entanto, o 2SFCA apresenta uma limitação importante: ele trata o acesso dentro da área de captação como igual para todos. Para superar isso, o método foi aprimorado ao incorporar funções de decaimento pela distância, dando origem ao *Enhanced* 2SFCA (E2SFCA) (Barríos; Moncada; Escobar, 2023; Luo *et al.*, 2018; Luo; Qi, 2009).

Este aprimoramento ajusta a situação espacial da oferta e da demanda ao reconhecer que a atratividade e a probabilidade de uso de um serviço diminuem à medida que a distância ou o tempo de viagem aumentam, isto é, a oferta mais próxima é sempre mais vantajosa. O E2SFCA, portanto, não apenas mede o acesso, mas o qualifica, gerando um índice mais graduado e sensível às variações espaciais.

O E2SFCA estende o 2SFCA ao dividir a área de alcance (d_0) em múltiplas zonas de viagem discretas e concêntricas (por exemplo, 0–10, 10–20 e 20–30 minutos) e aplicar pesos (W_l) a cada zona. Esses pesos, muitas vezes derivados de uma função de decaimento Gaussiano, diminuem à medida que a distância ou o tempo de viagem aumenta, refletindo um acesso menos conveniente.

A fórmula da primeira etapa do E2SFCA (que, assim como no 2SFCA original, calcula a razão oferta-demanda R_j) fica:

$$R_j = \frac{S_j}{\sum_{l \in [1,2,3]} \left(\sum_{k \in \{d_{kj} \in D_l\}} P_k \cdot W_l \right)} \quad \text{Equação 3}$$

onde:

- R_j = razão oferta-demanda para o local j .
- S_j = oferta no local j .
- P_k = população no local k .
- D_l = a l -ésima zona de tempo de viagem discreta (ex.: $l = 1$ é 0-10min)
- d_{kj} = tempo de viagem entre k e j .
- W_l = peso de decaimento da distância para a zona l .

E a fórmula da segunda etapa que calcula a acessibilidade final fica:

$$A_i^F = \sum_{l \in [1,2,3]} \sum_{j \in \{d_{ij} \leq D_l\}} R_j \cdot W_l \quad \text{Equação 4}$$

- A_i = acessibilidade no local da população i .
- R_j = razão oferta-demanda calculada na etapa 1.
- W_l = peso de decaimento da distância para a zona l da etapa 1.
- D_l = a l -ésima zona de tempo de viagem discreta.

- d_{ij} = distância/tempo da viagem entre o local i e o local j .

No Quadro 1 é mostrado as diferenças e objetivos dos métodos acima:

Quadro 1 – Diferenças fundamentais e objetivos dos métodos 2SFCA e E2SFCA.

Método	Diferença fundamental (inovação)	Abordagem de Acessibilidade	Objetivo Principal
2SFCA	Base: Usa uma distância/tempo de viagem de corte única (d_0) para definir a área de alcance.	Binária (0 ou 1): A população está totalmente dentro ou totalmente fora da área de alcance.	Oferecer uma medida de acessibilidade que seja mais intuitiva e interpretável (como uma razão oferta-demanda) do que o modelo de gravidade puro.
Método	Diferença fundamental (inovação)	Abordagem de Acessibilidade	Objetivo Principal
E2SFCA	Adiciona pesos de distância (W_i) por zonas de tempo de viagem discretas (ex.: 0-10, 10-20 min).	Ponderada por Zonas (Aprimorada): Reconhece que o acesso não é uniforme e decai com a distância, corrigindo a simplificação do 2SFCA.	Refletir o comportamento real do usuário, onde a propensão a viajar diminui com a distância, resultando em padrões de acessibilidade mais consistentes com a intuição.

Fonte: elaborado pelo autor (2025)

Apesar da sofisticação e adequação dessas ferramentas, sua aplicação enfrenta desafios. Os cálculos do método E2SFCA demandam um alto esforço técnico e conhecimento especializado em análise espacial, o que tem limitado seu uso predominantemente a contextos científicos, em vez de ser amplamente acessível a planejadores de saúde. Adicionalmente, a falta de análises em pequena escala dificulta a tomada de decisões objetivas sobre a alocação de recursos em áreas de superoferta ou suboferta (Krügel; Mäs, 2023).

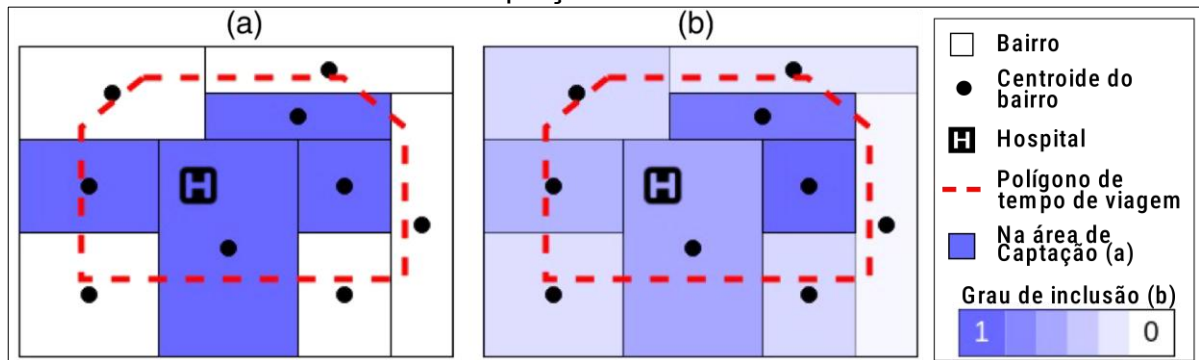
Também, esse método trata cada unidade geográfica de demanda (por exemplo: setor censitário, bairros, etc.) como se toda a sua população estivesse concentrada em um único ponto (centroide). Essa abordagem binária de inclusão (ou a unidade inteira está dentro da área de captação, ou não) introduz erros de mensuração significativos, particularmente em áreas urbanas densas ou quando os dados disponíveis são pouco granulares devido a restrições de privacidade (Bryant Jr; Delamater, 2019; Michels *et al.*, 2024)

3.4 O MÉTODO AREAL E2SFCA

Esta pesquisa adota o método *Areal Enhanced* 2SFCA (AE2SFCA), proposto por Michels *et al.* (2024), justamente para superar aquela limitação conceitual e metodológica.

A inovação central do AE2SFCA reside na substituição da verificação de matrizes de distância ponto a ponto (ou centroide-a-centroide) por uma verificação de sobreposição de área. Em vez de perguntar "o centroide da área k está a menos de d minutos do hospital j ?", o método pergunta "qual fração da área k está contida no polígono de tempo de viagem do hospital j ". Desta forma, o AE2SFCA propõe uma inovação ao utilizar polígonos de tempo de viagem (em vez de apenas distâncias de centroides) e incorpora a porcentagem de sobreposição (I_{jk}) da unidade geográfica populacional com esse polígono. Assim, uma unidade pode ser parcialmente incluída, assumindo um grau de inclusão entre zero e um, como se a população fosse uniformemente distribuída em sua área, conforme mostrado na Figura 1.

Figura 1 - Ilustrando a diferença entre (a) áreas de captação pontuais e (b) áreas de captação em área.



Fonte: Adaptado de Michels *et al.* (2024). Tradução feita pelo autor.

As abordagens tradicionais baseadas em pontos (Figura 1a) - 2SFCA e o E2SFCA - impõem uma inclusão estritamente binária (dentro ou fora), já que se baseiam na distância do centroide da área populacional. Em contraste, a abordagem de área (Figura 1b) - Areal 2SFCA - supera essa limitação ao permitir **graus de inclusão**, que são definidos pela **fração/razão de sobreposição** (I_{jk}). Essa razão é, essencialmente, a métrica utilizada para mensurar a **inclusão parcial** de uma unidade geográfica na área de captação.

A razão de sobreposição (I_{jk}) funciona como uma escala contínua entre 0 e 1:

- Se a unidade geográfica estiver completamente contida no polígono de tempo de viagem, a razão (I_{jk}) é 1.
- Se a unidade geográfica estiver totalmente fora, a razão (I_{jk}) é 0.

- Se, por exemplo, apenas 30% da área da unidade for coberta pelo polígono, a razão (I_{jk}) é 0,3, e é essa fração da população total (P_k) que será considerada no cálculo da demanda para aquele serviço.

Dessa forma, a razão de sobreposição é o valor numérico que expressa o grau de pertinência no que, conceitualmente, chama-se de **conjunto fuzzy** para as áreas de captação (Michels *et al.*, 2024).

O A2SFCA mantém a estrutura lógica em dois passos do 2SFCA, mas adapta suas fórmulas para incorporar a métrica de sobreposição areal (I_{jk}). A formulação básica do A2SFCA, sem considerar o decaimento pela distância dentro da área de captação, seria expressa pelas equações 5 e 6, respectivamente, para o Passo 1 (cálculo da razão R_j) e Passo 2 (cálculo da acessibilidade A_i):

$$R_j = \frac{S_j}{\sum_{k=1}^m P_k \cdot I_{jk}} \quad \text{Equação 5}$$

$$A_i = \sum_{j=1}^n R_j \cdot I_{ij} \quad \text{Equação 6}$$

No entanto, assim como o 2SFCA original, esta formulação básica do A2SFCA não diferencia o acesso dentro da área de captação. Para incorporar o efeito do decaimento pela distância, esta pesquisa utiliza a versão *Enhanced* do método areal, o AE2SFCA, cujas fórmulas (que incluem os pesos W_l) são detalhadas a seguir:

$$R_j = \frac{S_j}{\sum_{l \in [1,2,3]} (\sum_{k=1}^m P_k \cdot W_l \cdot I_{jkl})} \quad \text{Equação 7}$$

$$A_i = \sum_{l \in [1,2,3]} \sum_{j=1}^n R_j \cdot W_l \cdot I_{ijl} \quad \text{Equação 8}$$

onde:

- R_j é a razão oferta-demanda no local de oferta j (uma UBS).
- S_j é a oferta no local j .
- P_k é a população na unidade espacial k .
- W_l peso de decaimento da zona de tempo de viagem l .

- I_{jkl} razão de sobreposição entre a unidade k e o polígono de tempo de viagem da zona l do local j (a fração da área de k contida nessa zona).
- A_i acessibilidade na unidade i .
- I_{ijl} razão de sobreposição entre a unidade i e o polígono da zona l do local j .
- $l \in 1,2,3$ as zonas discretas de tempo de viagem (por exemplo, 0–10, 10–20, 20–30 min).
- m, n número de unidades populacionais e de locais de oferta.

As vantagens dessa abordagem areal são três: (1) maior precisão, ao abandonar a premissa irrealista de que toda a população vive no centroide; (2) menor sensibilidade à granularidade dos dados, pois o método funciona bem mesmo com unidades geográficas maiores, desde que os polígonos de tempo de viagem sejam precisos; e (3) flexibilidade de agregação, permitindo que os resultados sejam reportados em geografias arbitrárias, definidas pela própria sobreposição das áreas de serviço.

Ao adotar o AE2SFCA, esta pesquisa se posiciona na fronteira metodológica da análise de acessibilidade espacial, buscando resultados mais acurados para subsidiar políticas públicas mais equitativas.

4 METODOLOGIA

Do ponto de vista de seu enquadramento teórico-metodológico, esta pesquisa caracteriza-se pela adoção de uma abordagem quantitativa de caráter aplicado. A escolha por esse delineamento justifica-se pela necessidade de mensurar, de forma exata e objetiva, a distribuição espacial dos serviços de saúde e a iniquidade no acesso da população.

Para tanto, o estudo articula um rigoroso planejamento analítico que opera sobre variáveis numéricas e georreferenciadas, definindo com clareza a população e a amostra por meio de dados demográficos, socioeconômicos e da infraestrutura viária. Além de fornecer os instrumentos adequados para testar estatisticamente as hipóteses levantadas, esse enquadramento foi estruturado sob o pilar da reprodutibilidade exata, garantindo que todo o caminho investigativo e o controle das

variáveis possam ser integralmente auditados e replicados por outros pesquisadores e gestores.

No âmbito operacional, o núcleo desse delineamento quantitativo ancora-se na aplicação do método *Areal Enhanced Two-Step Floating Catchment Area* (AE2SFCA). A adoção dessa concepção teórica não é aleatória; ela é justificada por ser a resposta mais robusta para corrigir as distorções geométricas dos modelos tradicionais. O conjunto de técnicas para a construção dessa realidade investigada envolve a integração de rotinas em linguagem Python, a imputação de dados viários via Redes Neurais em Grafos (GNN) e procedimentos de análise estatística espacial, a exemplo dos Índices de Moran e Indicadores LISA.

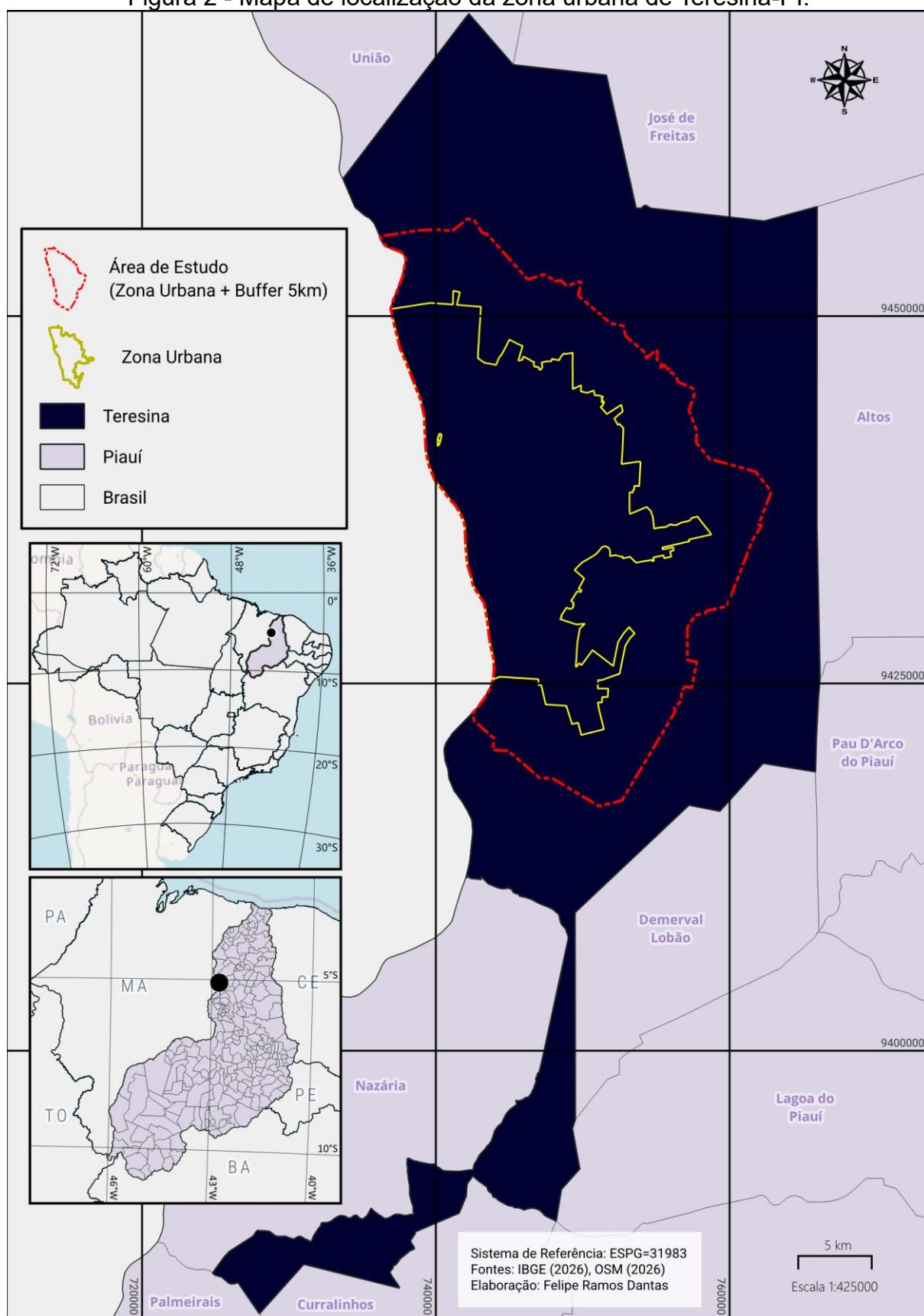
Nas seções a seguir, serão descritos a área de estudo e os procedimentos práticos adotados na pesquisa, partindo da aquisição e preparação dos dados até a aplicação do modelo de acessibilidade e a análise final das desigualdades

4.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo compreende a zona urbana do município de Teresina, capital do estado do Piauí, mais uma zona de amortecimento de 5 km (Figura 2). A escolha se justifica pelo papel da cidade como principal centro de serviços de saúde do estado, fornecendo atendimento de média e alta complexidade tanto para seus munícipes quanto para a população de outras cidades piauienses e de estados vizinhos.

Teresina é a única capital da Região Nordeste que não se localiza no litoral e, segundo o Censo Demográfico de 2022, possui uma população de 866.300 habitantes e uma área urbana de aproximadamente 272,66 km², dividida em 123 bairros que são administrados pelas Superintendências das Ações Administrativas Descentralizadas (SAAD) (IBGE, 2025).

Figura 2 - Mapa de localização da zona urbana de Teresina-PI.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

4.2 BASE DE DADOS E PRÉ-PROCESSAMENTO

Para garantir a rastreabilidade, reprodutibilidade e eficiência computacional, a análise desta pesquisa foi realizada utilizando um ecossistema de *softwares* livres e de código aberto, alinhado aos princípios FOSS (*Free and Open Source Software*). Este ecossistema promove a transparência metodológica, permitindo a verificação irrestrita dos algoritmos, e assegura a liberdade digital sem o custo de licenças comerciais.

O ecossistema computacional foi selecionado segundo três critérios: (i) maturidade e manutenção ativa, (ii) interoperabilidade pela adoção do padrão GeoDataFrame, e (iii) aderência à natureza do problema - análise de redes geográficas. O Quadro 2 sintetiza as bibliotecas e sua finalidade em cada etapa.

Quadro 2 – Bibliotecas Python utilizadas no roteiro computacional e sua finalidade por etapa.

Biblioteca	Finalidade no roteiro	Etapa (Notebook)
Geopandas	Manipulação de dados vetoriais e operações espaciais/topológicas	Todas
NumPy	Computação numérica e operações vetoriais	Diversos
pandas	Manipulação de dados tabulares (Censo, CNES, tabelas-síntese)	Diversos
Matplotlib	Geração das figuras e mapas temáticos	Diversos
Shapely	Operações geométricas (união, diferença, centroides)	01.1, 01.3
city2graph	Extração da Overture, grafo topológico, grafo dual e isócronas	01.2, 02.1, 04.1
overturemaps	Extração das pegadas de construção (edificações) da Overture	01.2
mapclassify	Classificação de dados para mapas coropléticos (quebras naturais, quantis)	01.3, 01.5, 05.1, 06.1
SciPy	Estatística descritiva (assimetria, curtose) e correlação de <i>Spearman</i>	01.5, 05.1, 05.2, 06.1
NetworkX	Conectividade e centralidade (<i>betweenness</i>) do grafo viário	02.1, 02.2
Scikit-learn	<i>Baseline Random Forest</i> e métricas de validação	02.2
PyTorch	<i>Backend</i> de tensores da Rede Neural em Grafos	02.2
PyTorch Geometric	Rede Neural em Grafos (<i>GraphSAGE</i>)	02.2
Esda/libpysal	Autocorrelação espacial (Moran, LISA)	06.1

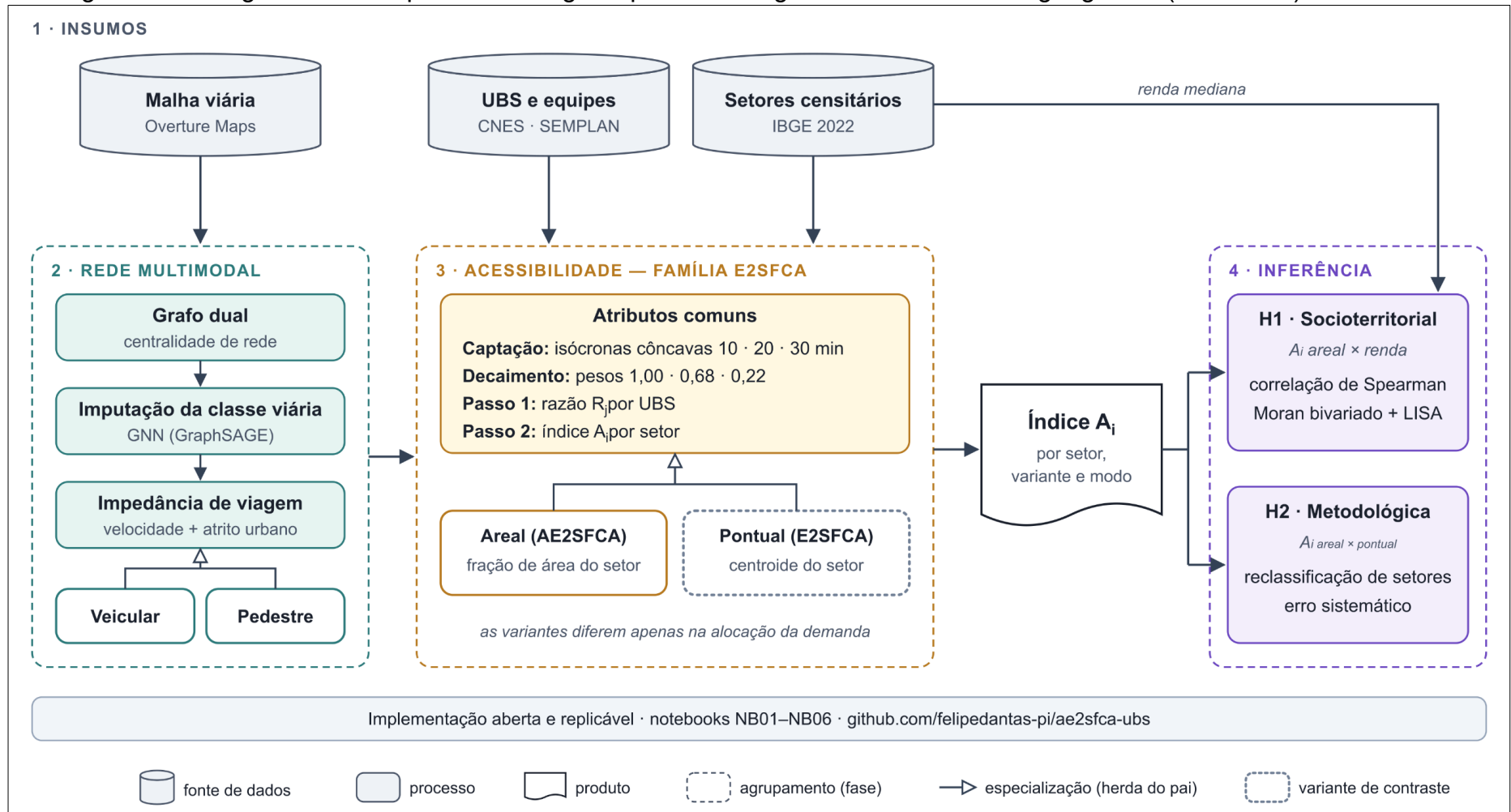
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Todo o roteiro computacional desenvolvido para a extração, limpeza e modelagem espacial dos dados foi estruturado na linguagem Python. Os scripts completos encontram-se compilados no formato de *Jupyter Notebooks* nos Apêndices desta dissertação, estando também disponibilizados publicamente no repositório oficial da pesquisa no GitHub¹.

Para materializar esse delineamento quantitativo e atestar a reprodutibilidade metodológica do modelo espacial proposto, a arquitetura de dados e as transições analíticas encontram-se sistematizadas visualmente no fluxograma a seguir (Figura 3). Este diagrama de blocos ilustra a progressão lógica da pesquisa: partindo da delimitação territorial e coleta da malha viária, avançando pelas etapas de imputação semântica via Redes Neurais em Grafos (GNN) e modelagem topológica, até culminar no cálculo computacional do índice AE2SFCA e sua respectiva validação estatística.

¹ <https://github.com/felipedantas-pi/ae2sfca-ubs>

Figura 3 - Fluxograma das etapas metodológicas para modelagem da acessibilidade geográfica (AE2SFCA) em Teresina.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Com a visão global do processo e a arquitetura do roteiro computacional estabelecidas, as subseções seguintes detalham a natureza geométrica e os atributos específicos de cada uma das fontes de dados primárias que alimentam as fases ilustradas neste modelo.

4.2.1 Fontes de dados

A execução desta pesquisa integrou múltiplos dados geoespaciais de fontes oficiais e colaborativas. O Quadro 3 detalha as bases de dados brutas utilizadas para a composição do modelo espacial.

Quadro 3 - Detalhamento da base de dados utilizada nesta pesquisa.

Nome		Descrição	Geometria	Fonte
Unidades Básicas de Saúde		Localização das UBS contidas na zona urbana de Teresina.	Ponto	Secretaria Municipal de Planejamento e Coordenação (SEMPPLAN)
Malha Territorial	Malha Municipal	Delimitação do perímetro oficial do município de Teresina.	Área	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)
	Setores Censitários	Delimitação dos setores censitários do tipo urbano	Área	
	Grade Estatística	Grade estatística que recobre a zona urbana de Teresina	Área	
Microdados do Censo		Tabelas de Demografia, Cor/Raça e Rendimento do Responsável.	Tabular	
Malha Viária		Segmentos viários e conectores (nós de interseção).	Linha/Ponto	Overture Maps Foundation
Edificações		Pegadas de construção (<i>building footprints</i>).	Polígono	

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

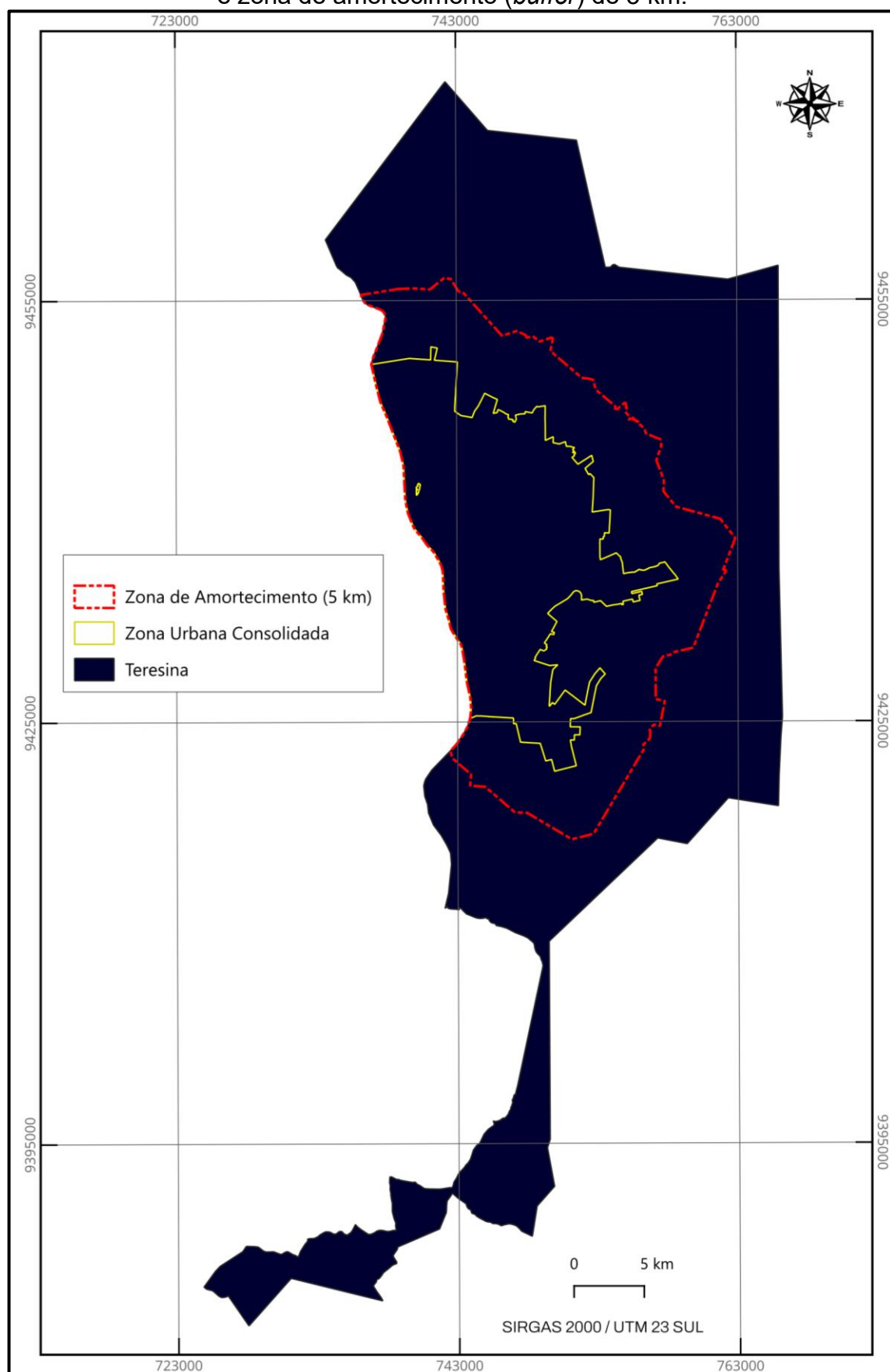
A localização das Unidades Básicas de Saúde, bem como as áreas de abrangência e de atuação das equipes de Saúde da Família, encontra-se disponível apenas para visualização em plataforma cartográfica pública da Prefeitura Municipal de Teresina, sem interface de programação para download automatizado. Constitui, portanto, a única etapa manual do roteiro: os dados foram exportados manualmente e incorporados ao pipeline, enquanto a capacidade instalada (número de equipes de Atenção Primária) foi obtida de forma automatizada do CNES/DataSUS. Essa exceção é registrada de forma transparente, sem comprometer a reprodutibilidade das demais etapas.

4.2.1.1 Estruturação da malha territorial e área de estudo

Para a operacionalização do modelo, a delimitação da área de estudo exige conciliar dois requisitos: a coerência entre a fronteira e as unidades de análise, e a mitigação dos efeitos de borda inerentes à análise de redes (Apêndice A, Notebook 01.1). A zona urbana foi delimitada a partir da própria malha de setores censitários cujo atributo 'situação' correspondia ao valor 'urbano', dissolvendo-se seus limites internos e restando-se exclusivamente a mancha territorial contígua que corresponde ao maior componente conectado. Os núcleos urbanos disjuntos (vilas e povoados destacados do tecido principal, identificados pelo atributo CD_NU (código do núcleo urbano) e NM_NU (nome do núcleo urbano) e somando 28 setores de menos de 5 km² cada) foram excluídos, por serem funcionalmente separados e incompatíveis com a análise de acessibilidade por rede viária contínua.

A fronteira da zona urbana assim obtida, além de fazer as unidades de demanda e o limite de estudo coincidirem por construção, coincide quase perfeitamente com o perímetro urbano definido por lei e disponibilizado pela Secretaria Municipal de Planejamento e Coordenação (SEMPLAM), o que confere validação externa à delimitação. Sobre esse perímetro consolidado aplicou-se uma zona de amortecimento (*buffer*) de 5 km, restrita ao limite municipal, utilizada apenas como envelope de cálculo para a extração da malha viária e a geração das isócronas, evitando a subestimação da acessibilidade na franja urbana, conforme Figura 4.

Figura 4 - Delimitação da área de estudo: limite municipal, zona urbana consolidada e zona de amortecimento (*buffer*) de 5 km.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

4.2.1.2 Dados censitários e demanda espacial

Para a representação da demanda, importaram-se os dados do Censo Demográfico de 2022 (Apêndice A, Notebook 01.1). Como a fronteira da zona urbana foi derivada dos próprios setores censitários de situação urbana, o conjunto de unidades de demanda coincide exatamente com a área de estudo, dispensando recortes adicionais. Cada setor foi mantido em sua geometria integral; nas etapas posteriores de visualização, as camadas calculadas sobre o envelope com *buffer* (velocidades, tempos de viagem e isócronas) foram recortadas à fronteira da zona urbana, uma vez que a zona rural não é objeto da análise.

Para integrar os atributos socioeconômicos às geometrias dos setores censitários, estruturou-se um fluxo automatizado de Extração, Transformação e Carga (ETL). As tabelas do Censo Demográfico de 2022 contendo as variáveis de demografia, rendimento e características dos domicílios foram adquiridas de forma direta via requisições HTTP aos repositórios oficiais do IBGE, sendo posteriormente filtradas para a retenção exclusiva das variáveis de interesse da pesquisa.

Quadro 4 - Variáveis socioeconômicas do Censo Demográfico de 2022 (IBGE) utilizadas na pesquisa.

Código IBGE	Descrição	Tabela de origem	Nome da variável no roteiro	Papel na pesquisa
V01006	População residente (total de moradores do setor)	Demografia	populacao	Demanda populacional (P_i) do índice AE2SFCA
V06006	Rendimento nominal mensal mediano da pessoa responsável	Rendimento do Responsável	renda_mediana	Indicador socioeconômico do teste H2 (resistente à assimetria)
V06004	Rendimento nominal mensal médio da pessoa responsável	Rendimento do Responsável	renda_media	Variável de apoio (comparação e robustez)

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Para sanar as inconsistências do sigilo estatístico do IBGE, os caracteres de oclusão foram tratados de forma distinta: o hífen ("-"), que representa zero absoluto, foi convertido no numeral 0 (zero), enquanto o "X" (valor omitido por sigilo) foi preservado como dado ausente, evitando a criação de falsos zeros que distorceriam as distribuições de população e renda.

4.2.1.3 Aquisição da infraestrutura viária e edificações

A infraestrutura urbana, responsável por ditar as rotas e os custos de deslocamento, foi extraída da plataforma colaborativa *Overture Maps Foundation* (Overture Maps Foundation, 2025) (Apêndice B, Notebook 01.2). Para garantir a reprodutibilidade perante as atualizações contínuas do servidor, fixou-se a extração na versão oficial de distribuição identificada sob a **tag release 2026-06-17.0**.

Os dados da malha viária foram obtidos por meio da biblioteca *city2graph*, versão 0.3.1 (Sato, 2026). A extração utilizou como perímetro de busca o polígono da área de estudo estabelecido na fase anterior (zona urbana com *buffer* de 5 km), previamente convertido para o sistema geográfico SIRGAS 2000 (EPSG:4674). A rede extraída foi decomposta em duas estruturas para a modelagem de grafos topológicos: os segmentos viários, atuando como arestas, e os conectores, atuando como nós.

Adicionalmente, utilizando o retângulo envolvente do município de Teresina por meio da biblioteca '*overturemaps-py*', obteve-se a camada de edificações. As geometrias destes polígonos atuam como proxies para a localização micrométrica dos domicílios, refinando a precisão dos pontos de origem da população no cálculo de acessibilidade. Ao término do processo, todos os dados extraídos foram reprojetados para o Sistema de Referência de Coordenadas métrico SIRGAS 2000 / UTM Zona 23 Sul (EPSG:31983), padronização imprescindível para o cálculo preciso das distâncias euclidianas e de rede no modelo AE2SFCA.

4.2.1.4 Caracterização socioeconômica da área de estudo

Duas variáveis socioeconômicas estruturam a pesquisa e foram preparadas nesta etapa: a população residente por setor censitário, que constitui a demanda do AE2SFCA, e a renda do responsável pelo domicílio, base do teste da hipótese de iniquidade territorial (H_1), examinada tanto pela média quanto pela mediana. Os setores sem dado utilizável, a saber, os setores especiais sem registro nas tabelas de agregados e aqueles com população e renda omitidas por sigilo estatístico, foram excluídos das análises, o que torna as estimativas conservadoras.

A análise exploratória compreendeu medidas de posição (média, mediana e quartis), de variabilidade (desvio-padrão, coeficiente de variação e distância interquartil) e de forma (assimetria e curtose). Dada a forte assimetria esperada para a renda, adotou-se a mediana como indicador de referência no teste da H_1 , por ser estatística resistente, não distorcida por valores extremos. Os valores atípicos foram

identificados pelo limites inferior e superior ao redor da porção central dos dados (Bussab; Morettin, 2023), em que se classifica como atípico superior todo setor cuja renda excede o limite $Q3$ (Terceiro Quartil) + $1,5 \times IQR$ (Intervalo Interquartilico).

A espacialização foi realizada por mapas coropléticos: a renda mediana classificada em faixas de múltiplos do salário mínimo, critério interpretável que isola os *hotsptos* de riqueza em classe própria, e a população em quintis. Reconhece-se que toda análise de dados agregados em unidades areais está sujeita ao Problema da Unidade de Área Modificável (MAUP) e ao viés ecológico (tirar conclusões sobre indivíduos a partir de dados agregados por grupo), de modo que parte da variabilidade observada decorre do recorte do setor, e não apenas da desigualdade subjacente; essa limitação é assumida e mitigada pela opção por medidas resistentes e pela manutenção do setor censitário, menor recorte com renda observada, como unidade de análise.

Os resultados desta caracterização são apresentados na seção 5.1.

4.2.1.5 Aquisição da oferta de saúde (UBS e capacidade instalada)

A oferta de Atenção Primária foi caracterizada a partir de duas fontes complementares: da plataforma cartográfica da Prefeitura Municipal de Teresina obtiveram-se a localização das Unidades Básicas de Saúde e a cobertura territorial declarada das equipes de Saúde da Família; do Cadastro Nacional de Estabelecimentos de Saúde, a capacidade instalada de cada unidade, medida pelo número de equipes de Atenção Primária.

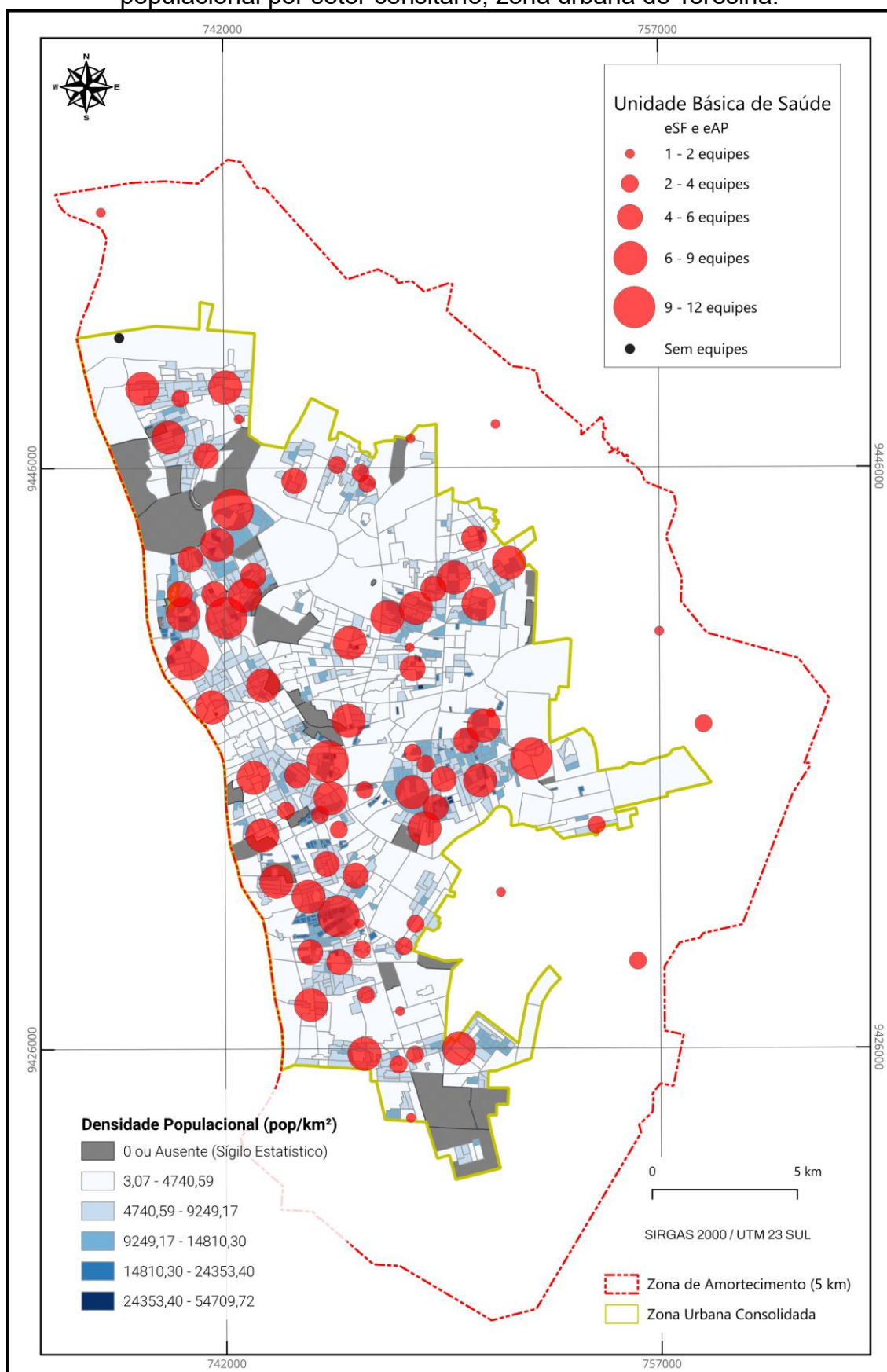
A localização das UBS constitui a única etapa não automatizada do roteiro. As coordenadas das unidades, assim como as áreas de abrangência e de atuação das equipes de Saúde da Família, encontram-se disponíveis apenas para visualização em plataforma cartográfica pública² da Prefeitura Municipal de Teresina (Secretaria Municipal de Planejamento e Coordenação, SEMPLAM), sem interface de programação que permita o *download* direto. Esses dados foram, portanto, exportados manualmente para arquivos vetoriais (KML) e incorporados ao pipeline. A exceção é registrada de forma transparente e não compromete a reprodutibilidade das demais etapas, todas automatizadas.

² <https://www.google.com/maps/d/u/0/viewer?mid=1hz-s5m9BZJNf3hqztH5SKVT6DINaoAte&ll=-5.08978475802348%2C-42.765517773528074&z=13>

As áreas de atuação das equipes de Saúde da Família, embora não integrem o cálculo do índice de acessibilidade, foram retidas (Apêndice C, Notebook 01.3) para mensurar a cobertura territorial formalmente declarada pela gestão, mobilizada nos resultados como contraponto administrativo à acessibilidade efetiva estimada pelo AE2SFCA.

A capacidade instalada, por sua vez, foi obtida de forma automatizada da Base de Dados do Cadastro Nacional de Estabelecimentos de Saúde (CNES/DataSUS), competência de abril de 2026 (Apêndice C, Notebook 01.3). Adotou-se a equipe de Atenção Primária como unidade de oferta – em vez de leitos ou de profissionais isolados – por constituir a unidade funcional de provisão do cuidado na Atenção Básica, conforme a Política Nacional de Atenção Básica. A partir da tabela de equipes (tbEquipe), retiveram-se exclusivamente as equipes ativas (sem data de desativação) do município de Teresina (código 221100) pertencentes à Atenção Primária, a saber, as equipes de Atenção Primária (eAP, tipo 70) e as equipes de Saúde da Família (eSF, tipo 71). O número de equipes por estabelecimento, agregado pelo código CNES, constitui a medida de oferta (S_j) utilizada pelo método AE2SFCA; as unidades sem correspondência na base receberam capacidade nula (Figura 5).

Figura 5 – Capacidade das Unidades Básicas de Saúde sobre a densidade populacional por setor censitário, zona urbana de Teresina.



Fonte: CNES/DataSUS (2026); SEMPLAM; IBGE. Elaborado pelo autor (2026).

Por fim, aplicou-se à camada de UBS o mesmo recorte espacial das demais etapas de cálculo: foram mantidas as unidades contidas na zona urbana acrescida da zona de amortecimento de 5 km, e não apenas as estritamente internas ao perímetro urbano. Essa decisão evita o efeito de borda, pois uma unidade situada na franja, ainda que fora do perímetro, possui área de captação que alcança a população urbana adjacente; descartá-la subestimaria a acessibilidade na borda. As unidades rurais distantes, fora do envelope de cálculo, foram excluídas por não atenderem à demanda urbana.

4.2.2 Limpeza, correção topológica e caracterização da malha viária

A malha viária obtida junto à *Overture Maps* para área de estudo totalizou 46.970 segmentos (Apêndice D, Notebook 02.1). A avaliação preliminar sobre a integridade desses dados (Tabela 1) revelou que, embora atributos como classe funcional e conectores estejam totalmente preenchidos, dados essenciais para o cálculo de rotas apresentam vazios importantes, com registro de nomes em 76,7% das vias, superfície em 28,1% e velocidade regulamentar em apenas 11,9%. A existência dessas ausências de dados justifica a aplicação dos métodos de correção e estimativa de informações apresentados adiante.

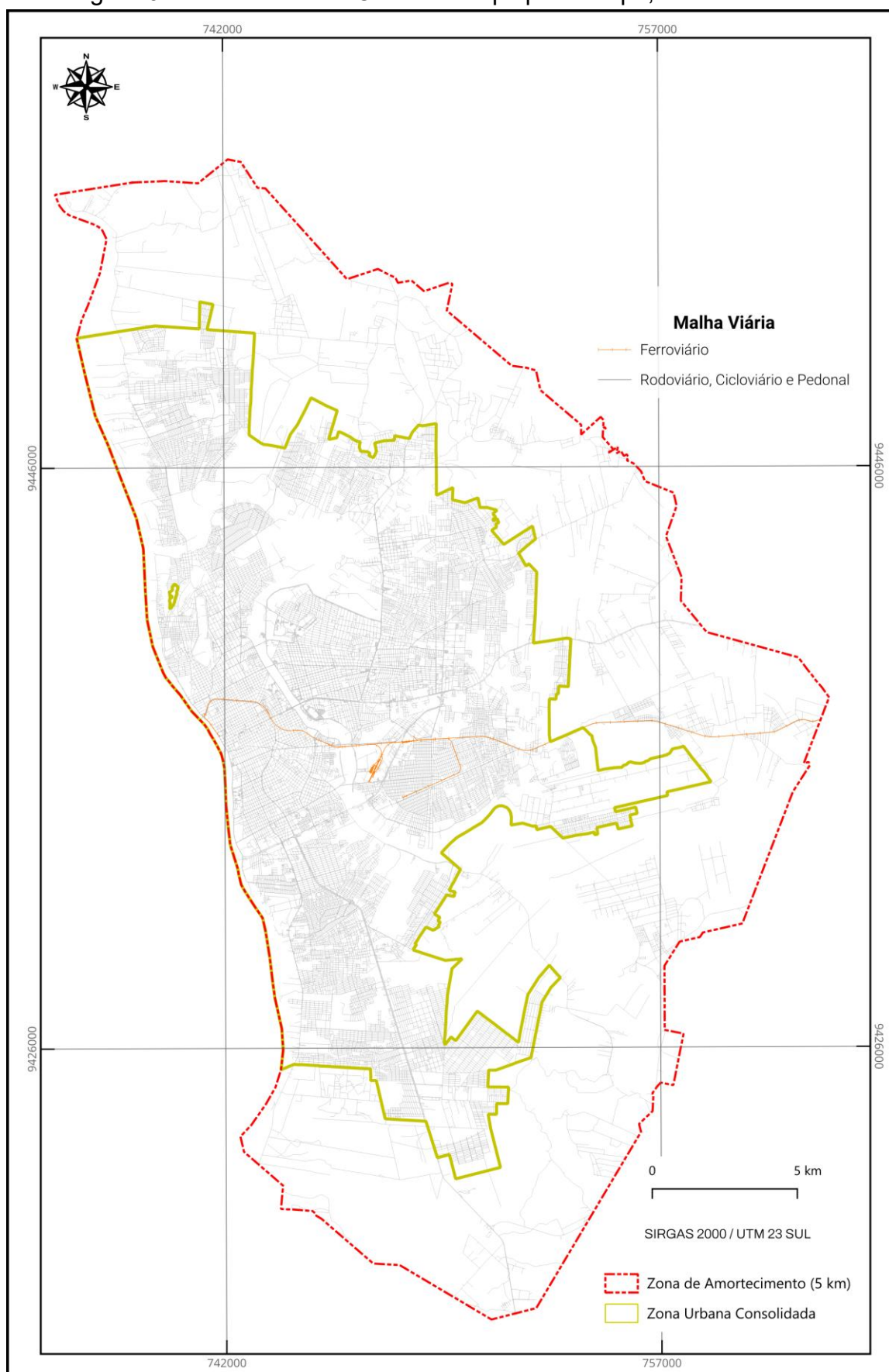
Tabela 1 – Integridade das variáveis de interesse da malha viária bruta.

Atributo		Descrição	Preenchido	Preenchido (%)
Original	Tradução			
<i>subtype</i>	Subtipo	Tipo de infraestrutura (<i>road</i> , <i>rail</i> e outros)	46.970	100,00
<i>class</i>	Classe	Classe funcional da via (<i>primary</i> , <i>residential</i> e outros)	46.970	100,00
<i>names</i>	Nome	Nome(s) da via - estrutura aninhada	36.041	76,70
<i>road_surface</i>	Superfície da via	Tipo de superfície - estrutura aninhada	13.182	28,10
<i>speed_limits</i>	Limites de velocidade	Velocidade regulamentar - estrutura aninhada	5.593	11,90

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A malha viária integra diferentes modos de deslocamento, assim, filtrou-se apenas o subtipo via (*road*), excluindo 38 segmentos ferroviários (*rail*) (0,08% da malha), o que resultou em 46.932 segmentos viários (Figura 6).

Figura 6 - Malha bruta da Overture Maps por subtipo, área de estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com dados da *Overture Maps Foundation* (2026).

Por meio da biblioteca *city2graph* (versão 0.3.1), realizaram-se o fatiamento das vias nas interseções e o ajuste de aproximação (*snapping*) dos nós viários, convertendo os 46.932 segmentos originais em 52.977 arestas. Como a extensão total da malha viária foi rigorosamente preservada em 4.817,7 km (com variação insignificante de 0,001%), confirma-se que a operação manteve a integridade geométrica original da rede urbana de Teresina.

O grafo resultante apresentou 35.187 nós e 45 sub-redes independentes (componentes conexos). Desse total, 99,37% dos nós encontram-se plenamente integrados à rede viária principal de tráfego (componente gigante), indicando que a malha está apta para a simulação realista de rotas. A morfologia urbana das interseções revelou um predomínio de nós de três vias (com grau de conexão $k = 3$, representando 57,5% dos cruzamentos) sobre cruzamentos tradicionais de quatro vias ($k = 4$, correspondendo a 26,1%), restando apenas 11,4% de vias sem saída.

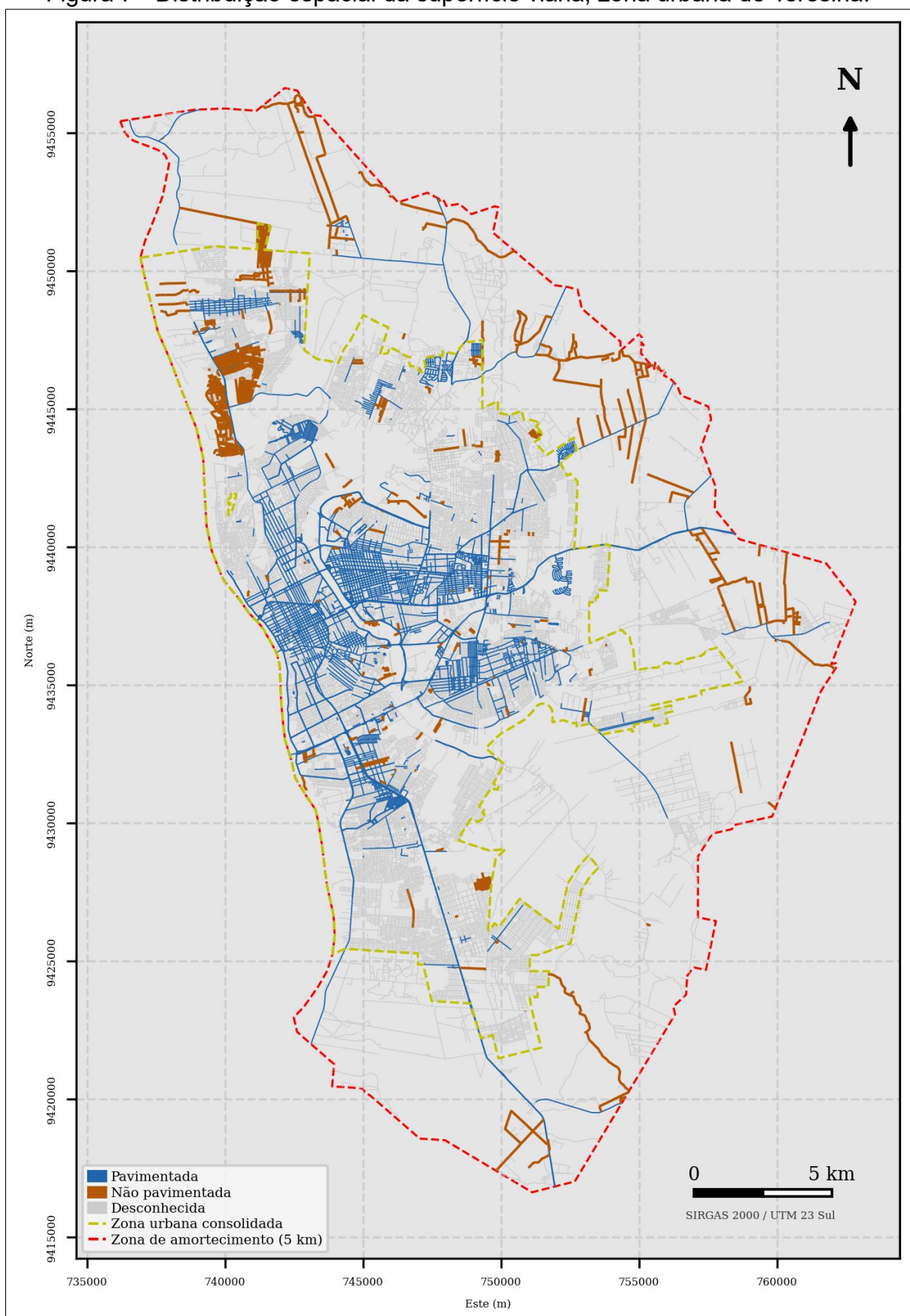
A superfície da via, conhecida em apenas 29,1% das arestas (das quais 87,8% pavimentadas), concentra a não pavimentação nas classes residencial (4,2%) e não classificada (31,1%) (Figura 7 e Tabela 2), evidência de que as vias de menor hierarquia e periféricas são predominantemente de terra, o que justifica seu uso como atributo preditor da GNN e a penalização de impedância das vias não pavimentadas.

Tabela 2 - Superfície da via por classe funcional (% na linha).

Classe	Desconhecida	Não pavimentada	Pavimentada
Passarela / Calçada (<i>footway</i>)	68,1	0,2	31,7
Via Compartilhada (<i>living_street</i>)	94,9	0,2	5,0
Primária (<i>primary</i>)	26,0	0,0	74,0
Residencial (<i>residential</i>)	80,0	4,2	15,9
Secundária (<i>Secondary</i>)	10,9	0,0	89,1
Serviço (<i>service</i>)	87,9	0,8	11,3
Terciária (<i>tertiary</i>)	53,2	0,0	46,7

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

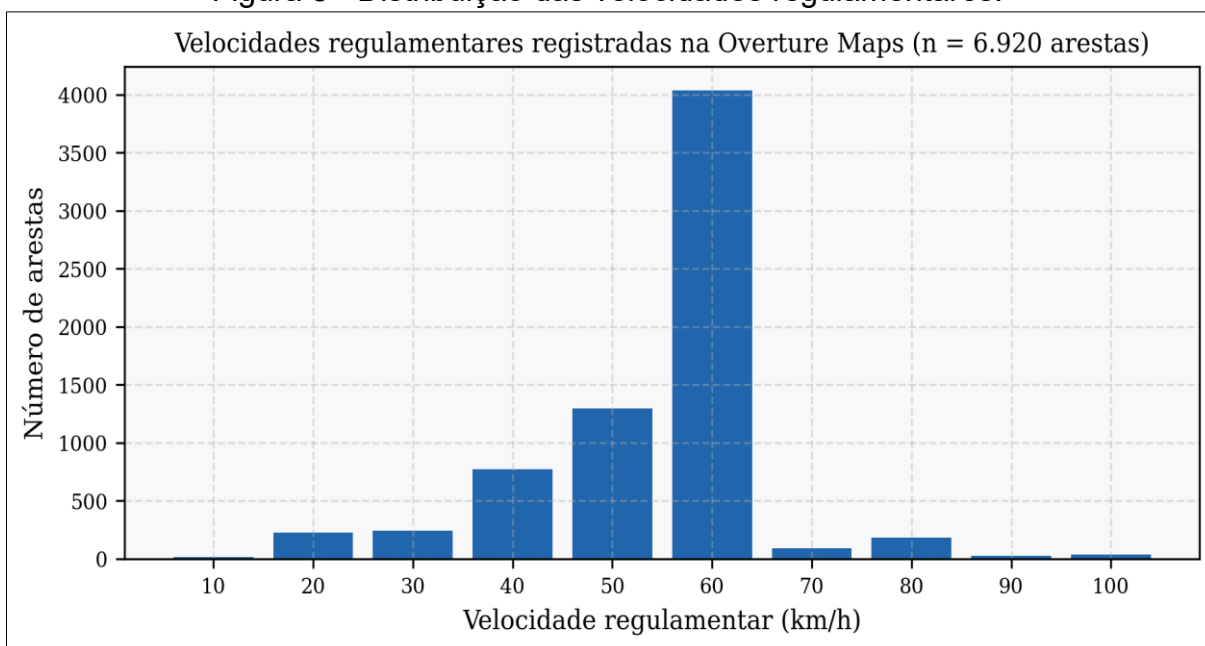
Figura 7 - Distribuição espacial da superfície viária, zona urbana de Teresina.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com dados da Overture Maps Foundation (2026), IBGE (2022).

Os limites de velocidade regulamentar estão registrados em apenas 13,1% dos segmentos da malha viária, apresentando uma velocidade média de 54,4 km/h. Apesar dessa escassez, as medianas observadas são condizentes com a hierarquia das vias, registrando 80 km/h nas arteriais principais (classificadas como trunk), 60 km/h nas vias primárias, secundárias e terciárias, e 40 km/h nas vias de caráter residencial (Figura 8). Esse cenário de dados esparsos justifica a decisão metodológica de estimar as velocidades de fluxo com base na classe funcional de cada segmento durante a etapa de cálculo das impedâncias.

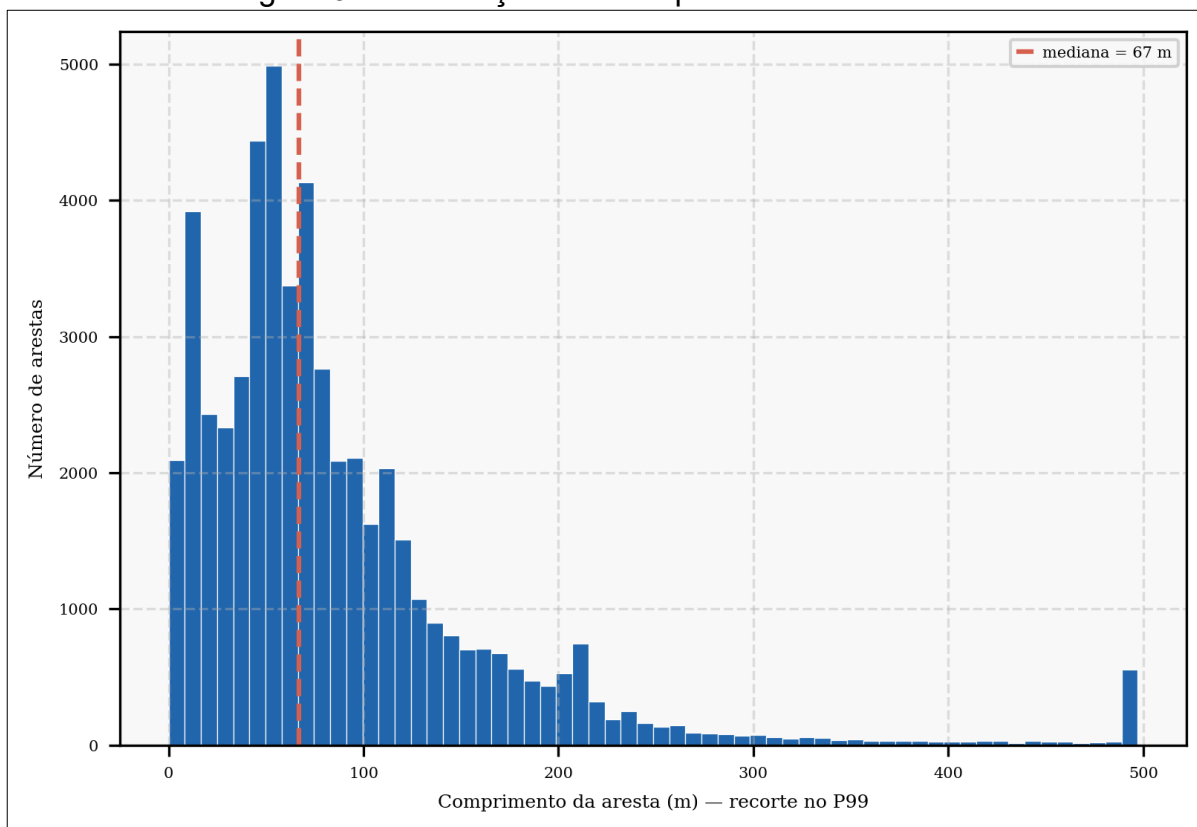
Figura 8 - Distribuição das velocidades regulamentares.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com dados da Overture Maps Foundation (2026)

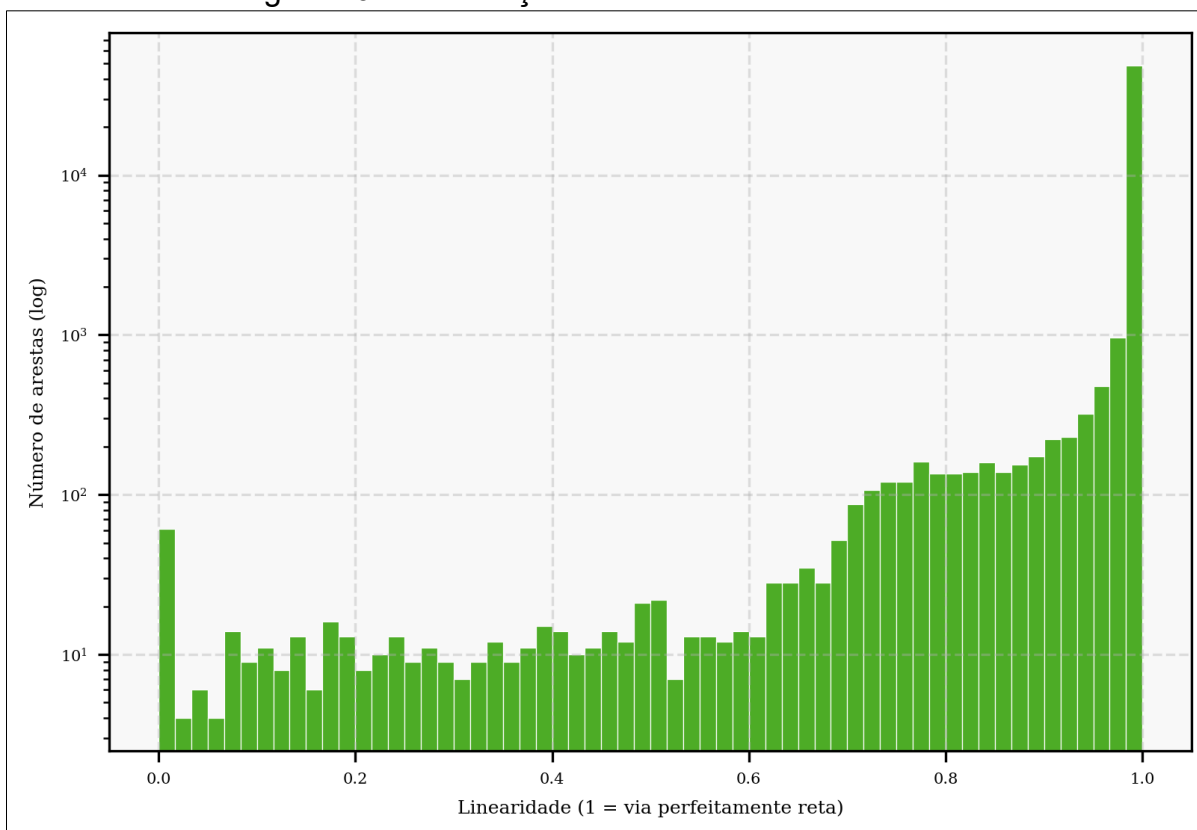
A caracterização da malha viária é completada por atributos geométricos e de identificação espacial. O comprimento mediano (Figura 9) das arestas foi de 67 metros, enquanto a linearidade média (Figura 10) atingiu o índice de 0,985, integrando o vetor de variáveis topológicas do modelo. Adicionalmente, verifica-se que a presença de nomenclatura oficial na base de dados é expressiva, com 39.012 segmentos viários devidamente identificados por seus nomes (representando 73,6% do total de arestas).

Figura 9 - Distribuições de comprimento das arestas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com dados da Overture Maps Foundation (2026)

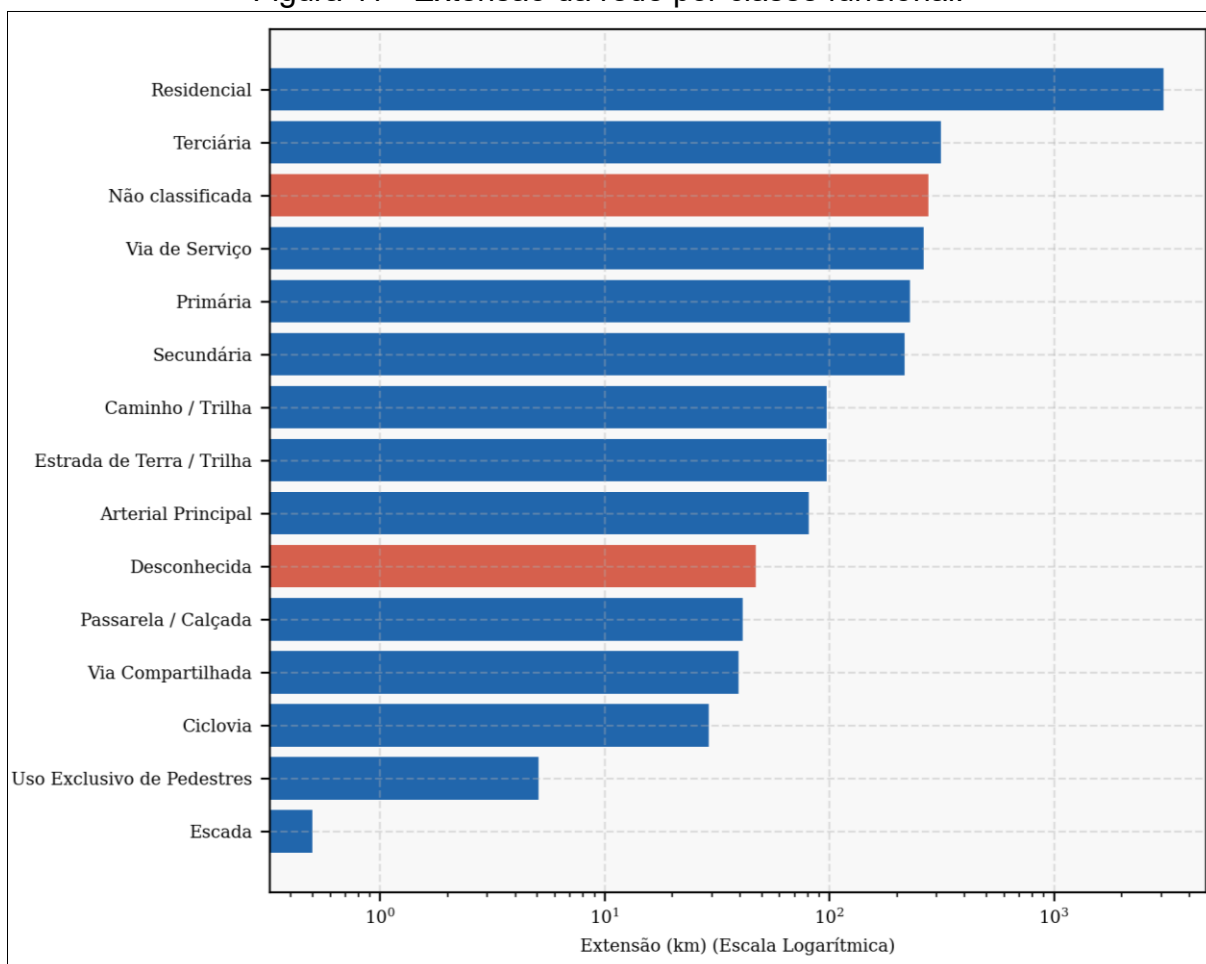
Figura 10 - Distribuições da linearidade das arestas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com dados da Overture Maps Foundation (2026)

A rede viária urbana de Teresina é composta majoritariamente por vias residenciais (classificadas sob a *tag residential*), as quais representam 64,2% do total de arestas analisadas (Figura 11). Em contrapartida, apenas 3,1% dos segmentos viários (o equivalente a 1.640 arestas) não possuem uma classe funcional definida na base de dados original, constando sob as categorias de desconhecida (*unknown*) ou não classificada (*unclassified*).

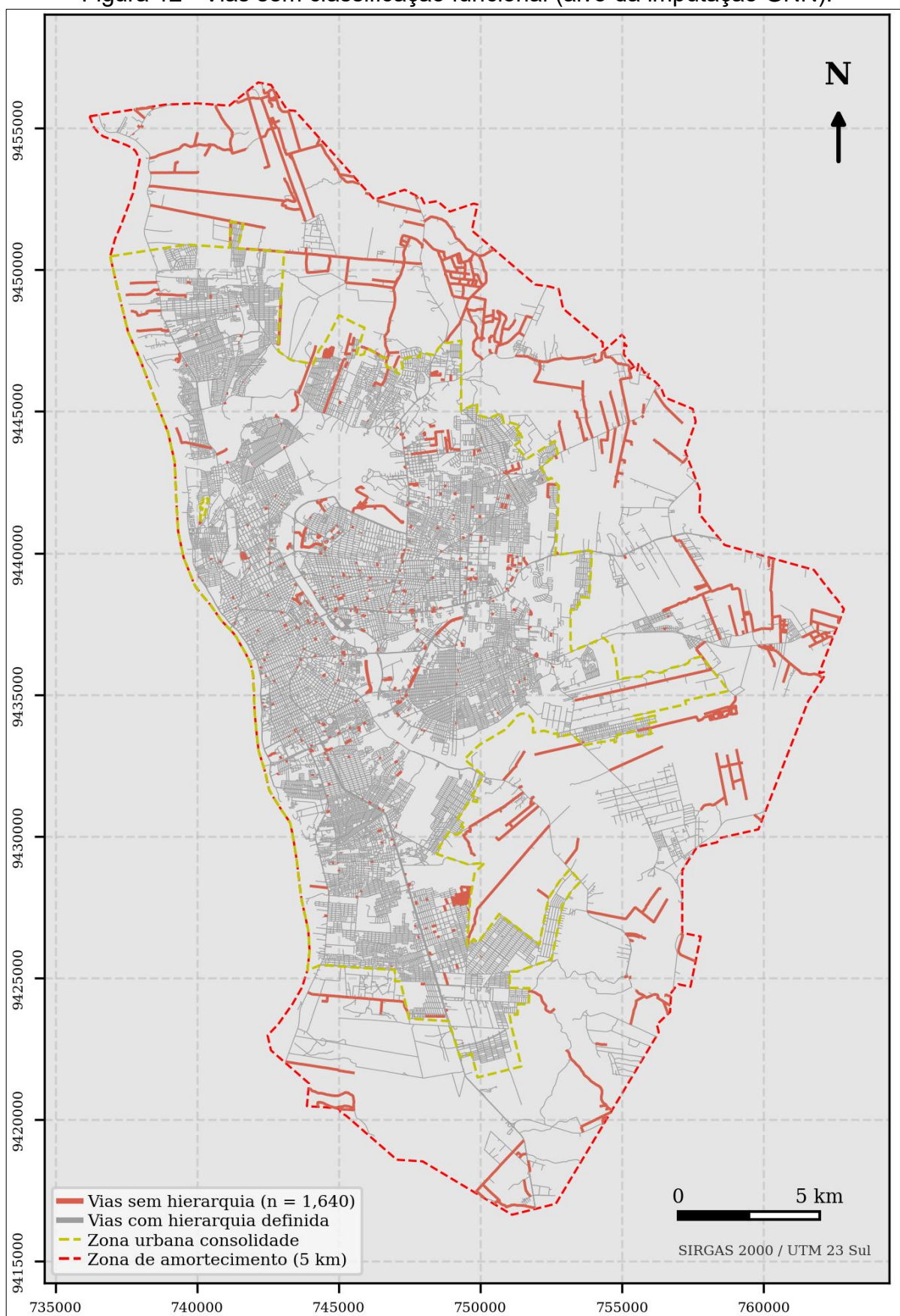
Figura 11 - Extensão da rede por classe funcional.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com dados da Overture Maps Foundation (2026)

Essa ausência de classificação concentra-se na periferia (Figura 12), região de menor detalhamento no mapeamento colaborativo. Como a categoria da via dita sua velocidade e impedância, não tratar essas lacunas subestimaria a acessibilidade nos setores de maior vulnerabilidade social, comprometendo a análise de equidade proposta na hipótese H_1 .

Figura 12 - Vias sem classificação funcional (alvo da imputação GNN).



Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com dados da Overture Maps Foundation (2026), IBGE (2022).

A necessidade de consolidação, auditoria e controle de qualidade dessas transformações viárias justifica a apresentação da Tabela 3, que reúne uma síntese estruturada da malha urbana de Teresina após as etapas de limpeza e modelagem. Este inventário estatístico-topológico funciona como um marco de validação metodológica antes da execução das etapas de roteamento. Seus indicadores comprovam, sob a ótica de estrutura e topologia, a coesão matemática do grafo (com 99,37% dos nós integrados à rede principal), garantindo que as simulações não sofram com desconexões artificiais. Paralelamente, as métricas de dimensões e geometria e de integridade de atributos oferecem um diagnóstico preciso sobre as características físicas do sistema viário e o grau de completude das informações originais, fundamentando a necessidade das modelagens preditivas aplicadas na sequência.

Tabela 3 - Síntese da malha viária pós-processamento.

Categoria Temática	Indicador Analítico	Unidade de medida	Valor obtido
Estrutura e topologia do grafo	Segmentos brutos extraídos (Overture)	Segmentos	46.970
	Segmentos rodoviários (pós-filtro de subtipo)	Segmentos	46.932
	Arestas do grafo (pós-correção de interseções)	Arestas	52.977
	Nós do grafo (interseções e terminais)	Nós	35.187
	Componentes conexos (sub-redes independentes)	Unidades	45
	Integração de nós na malha viária principal	% de nós	99,37
	Vias sem saída (pontas soltas)	% de nós	11,4
Dimensões e Geometria da Rede	Extensão total da rede viária	Quilômetros (km)	4.817,70
	Densidade viária na Zona Urbana	km/km ²	15,29
	Comprimento mediano da aresta viária	Metros (m)	67,00
	Linearidade geométrica média	Adimensional	0,985

Categoria Temática	Indicador Analítico	Unidade de medida	Valor obtido
Integridade dos Atributos	Vias com nomenclatura registrada	% de arestas	73,60
	Vias com tipo de superfície identificado	% de arestas	29,10
	Vias pavimentadas (sobre as de superfície conhecida)	% de arestas	87,80
	Vias com limite de velocidade regulamentar	% de arestas	13,10

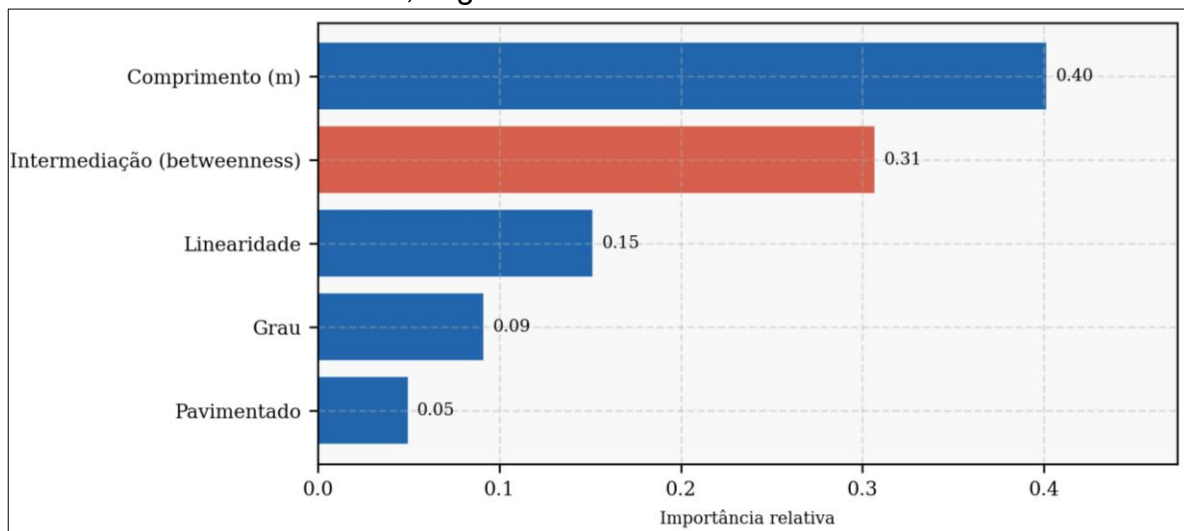
Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com dados da Overture Maps Foundation (2026).

4.2.3 Imputação de classes funcionais por Rede Neural em Grafos

A remoção dos segmentos sem hierarquia funcional foi descartada, pois essa abordagem fragmentaria a malha viária e comprometeria sua integridade topológica, gerando desconexões artificiais que distorceriam o roteamento e o cálculo das distâncias. Adotou-se, em substituição, a imputação da classe ausente por meio de uma Rede Neural em Grafos (*Graph Neural Network*, GNN), abordagem que aprende os padrões das vias já classificadas a partir tanto de seus atributos intrínsecos quanto de seu contexto na rede (Fonseca *et al.*, 2022) (Apêndice E, Notebook 02.2). Dos 52.977 segmentos da malha viária, 51.337 possuíam classe hierárquica conhecida, os quais constituíram o conjunto de treinamento, enquanto os 1.640 restantes (3,1%) formaram o alvo da imputação.

O vetor de atributos combinou características intrínsecas – comprimento, linearidade e condição de pavimentação – e medidas de centralidade de rede, nomeadamente o grau do nó e a intermediação (*betweenness*), calculadas com a biblioteca *networkx*. Dada a dimensão da rede, a intermediação foi estimada por amostragem de nós. A pertinência da centralidade foi confirmada empiricamente: na análise de importância das variáveis de um modelo de referência *Random Forest* (Figura 13), o comprimento respondeu por 40% da relevância e a intermediação por 31%, totalizando 71% entre os dois atributos, ao passo que o grau (9%) e a pavimentação (5%) apresentaram peso marginal. Esse resultado corrobora a literatura, segundo a qual atributos de centralidade elevam substancialmente a acurácia da classificação de vias, enquanto atributos estritamente geométricos exercem efeito limitado (Hacar; Altafini; Cutini, 2024).

Figura 13 - Importância relativa das variáveis preditoras na classificação funcional das vias, segundo o modelo Random Forest

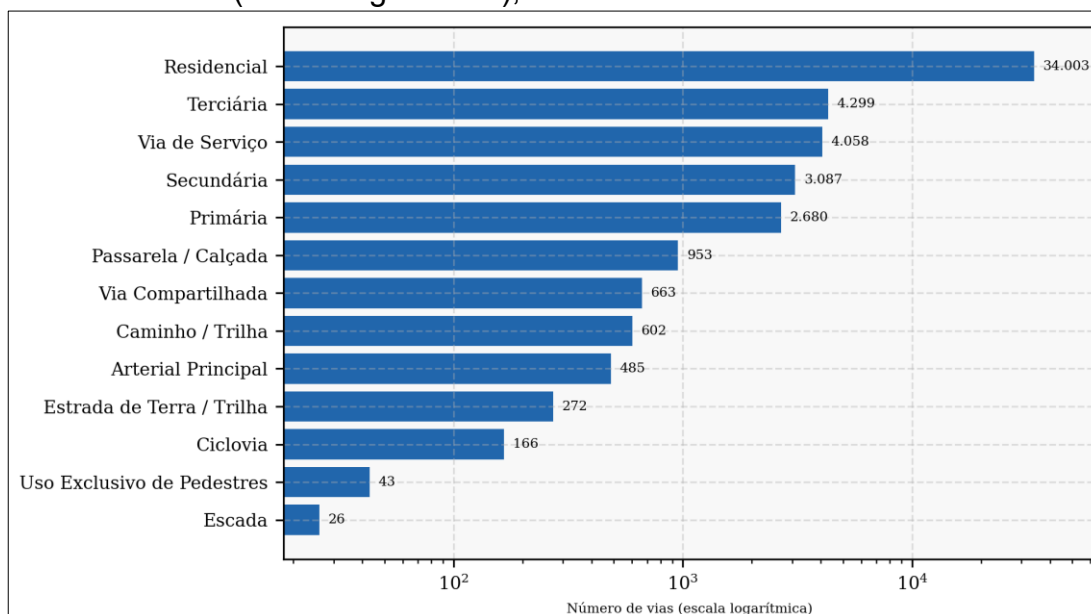


Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com dados da Overture Maps Foundation (2026).

Para que cada via fosse tratada como uma unidade a classificar, a rede foi convertida em sua representação de grafo dual, em que cada via se torna um nó e as interseções compartilhadas definem as conexões, resultando em 52.977 nós e 119.538 ligações. Essa conformação é exigida pela tarefa de classificação de nós. Sobre essa estrutura, aplicou-se a arquitetura *GraphSAGE* (Hamilton; Ying; Leskovec, 2018), uma rede convolucional em grafos que atualiza a representação de cada via agregando, de forma iterativa, a informação de sua vizinhança topológica.

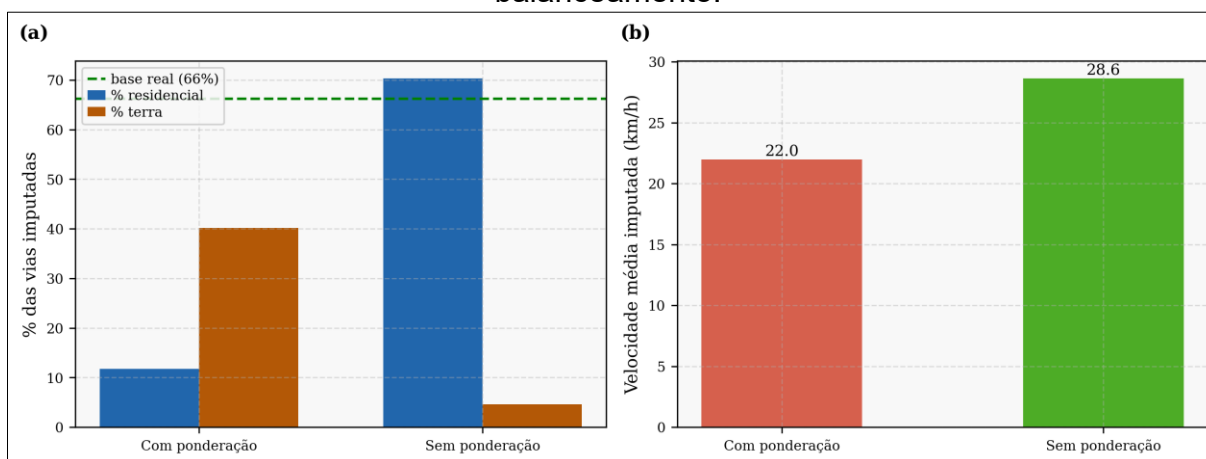
O conjunto de treinamento apresentou forte desbalanceamento, com a classe residencial concentrando cerca de dois terços dos segmentos classificados (Figura 14). Avaliou-se, por isso, a pertinência de ponderar as classes pelo inverso de sua frequência na função de perda. Um experimento controlado (Figura 15) comparou os cenários com e sem ponderação, considerando não apenas o F1, mas também a distribuição das classes imputadas e a velocidade média resultante. A ponderação elevou marginalmente o F1 macro (de 0,25 para 0,27), porém degradou o F1 ponderado (de 0,67 para 0,55) e distorceu gravemente a imputação: a proporção de vias residenciais previstas recuou de 70%, valor próximo à frequência real de 66%, para 12%, enquanto as vias de terra (*track*) saltaram de 5% para 40%, reduzindo a velocidade média estimada dos segmentos imputados de 28,6 km/h para 22,0 km/h. Como esse viés contaminaria sistematicamente o cálculo de impedâncias e de acessibilidade, adotou-se o modelo sem ponderação, que preserva a distribuição empírica das classes.

Figura 14 - Frequência das classes funcionais nos segmentos com classificação conhecida (escala logarítmica), zona urbana de Teresina e entorno.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com dados da Overture Maps Foundation.

Figura 15 - Efeito da ponderação de classes sobre a imputação: composição das classes previstas e velocidade média estimada, nos cenários com e sem balanceamento.



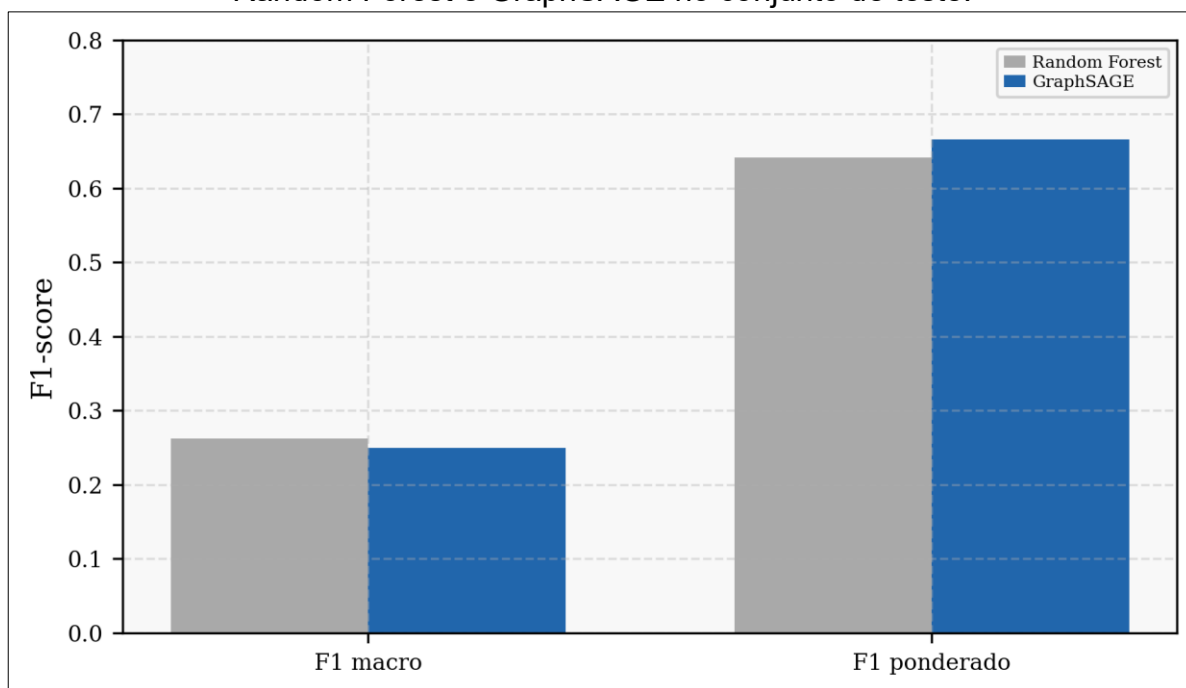
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

A validação da arquitetura selecionada ocorreu por meio da comparação direta com o algoritmo *Random Forest* (Breiman, 2001), treinado sob os mesmos atributos e a partir de idêntica partição de dados. No conjunto de teste, o modelo *GraphSAGE* superou o classificador de referência no índice F1-score ponderado, registrando 0,67 contra 0,64 (Figura 16). Esse desempenho superior confirma o ganho metodológico ao incorporar explicitamente as relações de vizinhança do grafo, uma informação inacessível ao modelo tradicional, que analisa cada via de forma isolada.

O desempenho de ambos os classificadores se mostrou equivalente na métrica *F1-score* macro, atingindo as marcas de 0,25 e 0,26. Essa paridade ocorre porque a

métrica macro é fortemente influenciada por classes raras e sub-representadas na base de dados, as quais dispõem de pouquíssimas amostras para o treinamento. Assim, esse indicador específico revela-se menos representativo para a finalidade prática de imputação de atributos na malha viária urbana de Teresina.

Figura 16 - Desempenho preditivo (F1-score macro e ponderado) dos modelos Random Forest e GraphSAGE no conjunto de teste.

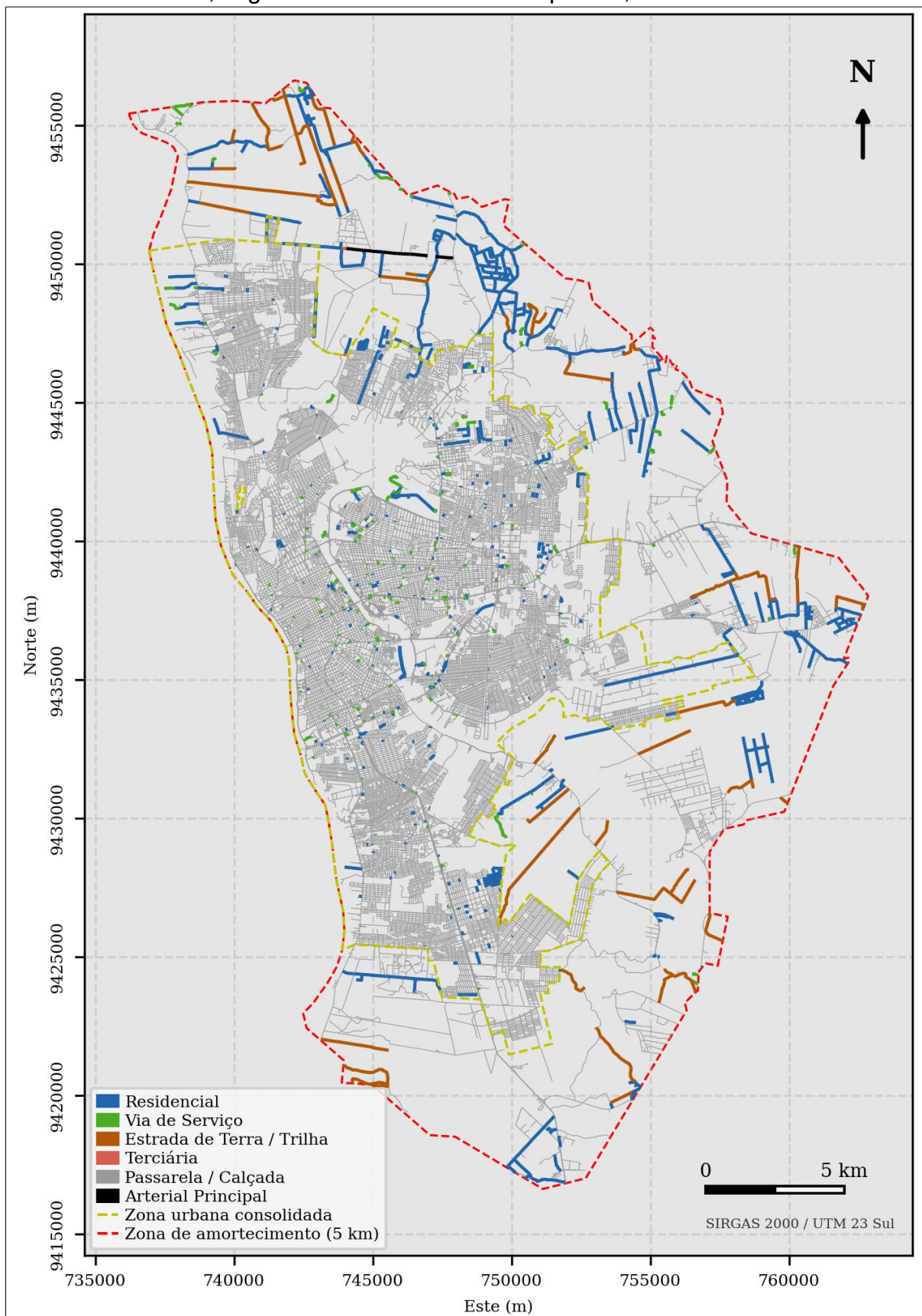


Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

A aplicação do modelo final ocorreu exclusivamente sobre os 1.640 segmentos sem classificação prévia, o que preservou intactas as categorias originais e gerou uma coluna de auditoria para controle do processo. A distribuição dos atributos imputados mostrou-se condizente com o padrão estrutural da rede viária de Teresina, resultando em 1.153 vias residenciais (70%), 333 vias de serviço e 76 vias de terra.

Do ponto de vista espacial, essas vias imputadas concentram-se na periferia (Figura 17), refletindo a menor cobertura do mapeamento colaborativo nessas áreas. Por fim, a exportação da malha rodoviária totalmente classificada em formato *GeoParquet* consolidou a base de dados estruturada que servirá de insumo para o cálculo subsequente das impedâncias de deslocamento.

Figura 17 - Distribuição espacial dos segmentos viários reclassificados pela Rede Neural em Grafos, segundo a classe funcional imputada, zona urbana de Teresina.



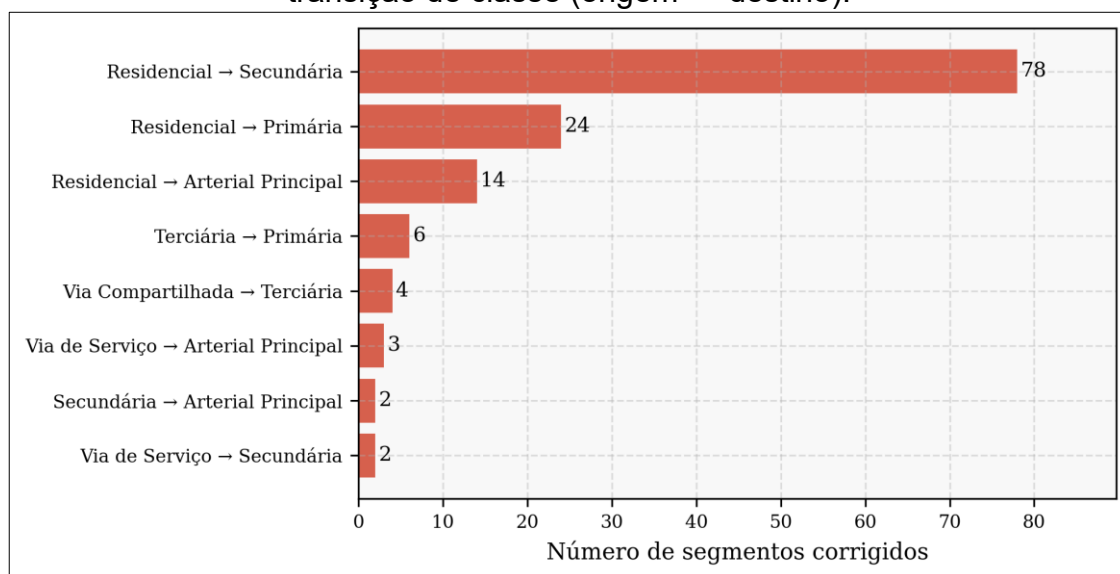
Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com dados da Overture Maps Foundation e do IBGE.

Por fim, a inspeção da malha classificada revelou discontinuidades funcionais pontuais herdadas da base colaborativa: corredores contínuos, identificados por um mesmo logradouro, apresentavam, em trechos curtos, segmentos rotulados em classe hierárquica muito inferior, como trechos residenciais de poucos metros no interior de vias primárias. Embora minoritárias, tais rupturas introduziriam gargalos artificiais de velocidade.

A correção de continuidade da malha viária fundamentou-se no princípio da boa continuação de redes (strokes; Thomson, 2003). Essa etapa, de caráter conservador e posterior à imputação por inteligência artificial, aplicou-se estritamente a segmentos de alta confiança que atendessem a cinco critérios cumulativos: integração a um corredor nomeado; viabilidade de tráfego dirigível; posicionamento de ao menos dois níveis hierárquicos abaixo da classe dominante da via; pertencimento a um eixo coeso em que a classe principal respondesse por no mínimo 60% da extensão; e comprimento reduzido, inferior a 150 metros.

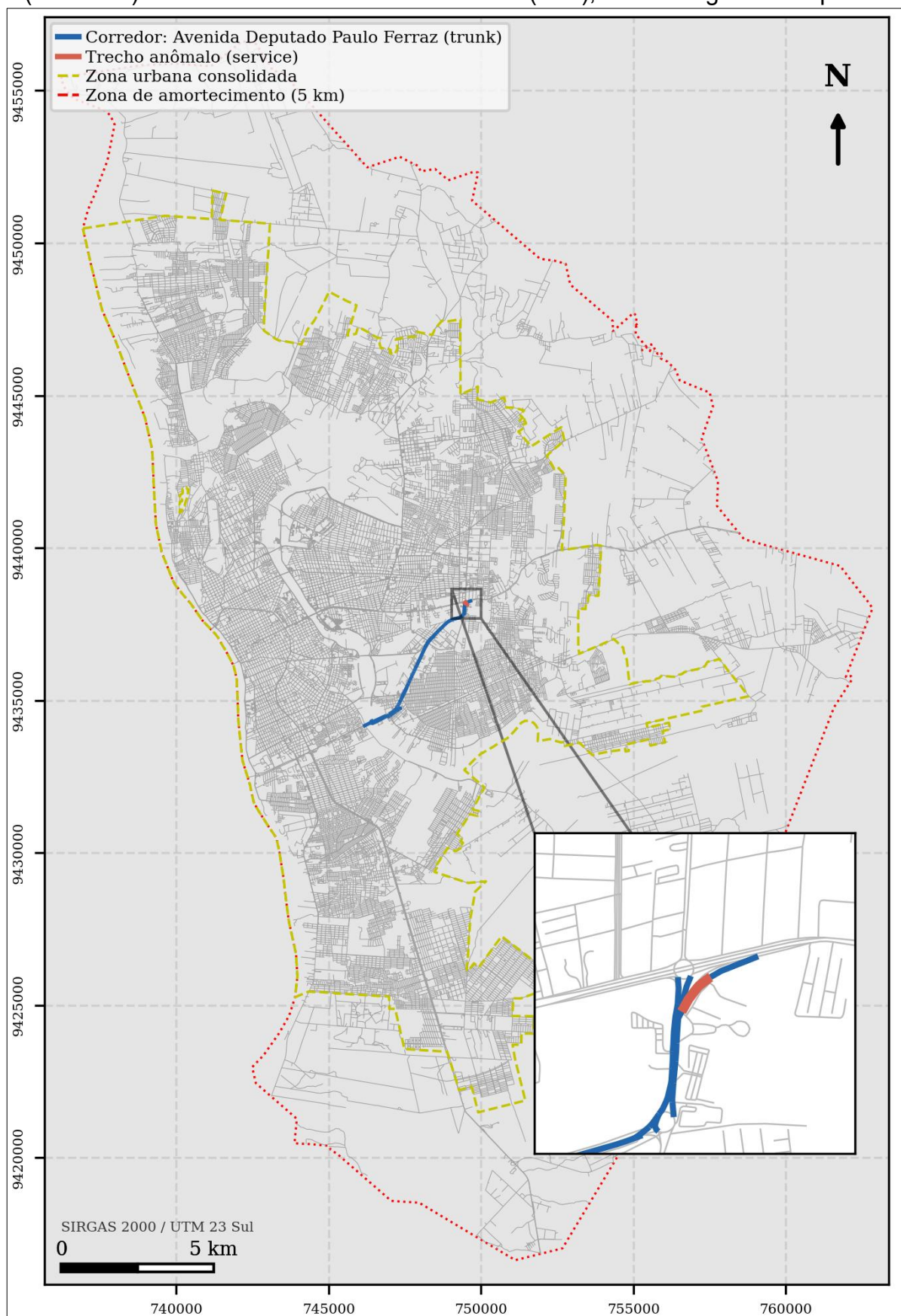
Essa abordagem resultou na reclassificação de 133 segmentos viários (0,25% da malha), predominantemente de vias residenciais para secundárias (78 casos), primárias (24 casos) e arteriais principais (14 casos) (Figura 18), corrigindo distorções em avenidas estruturantes como a Avenida Prefeito Wall Ferraz (Figura 19). Para assegurar a auditabilidade do processo, a categoria originalmente estimada pela rede neural foi preservada, registrando-se as correções finais em uma coluna específica (*class_final*) e em uma tabela de controle de alterações."

Figura 18 - Número de segmentos corrigidos na etapa de continuidade funcional, por transição de classe (origem → destino).



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Figura 19 - Exemplo de quebra de continuidade funcional corrigida: trecho anômalo (vermelho) no interior de um corredor contínuo (azul), em visão geral e ampliada.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com dados da Overture Maps Foundation e do IBGE

4.2.4 Definição de Velocidades e Cálculo de Impedâncias

A conversão da malha classificada em uma rede roteável exigiu atribuir a cada aresta um custo de deslocamento (impedância) expresso em tempo, por modo (Apêndice F, Notebook 03.1). Como a base não dispunha de velocidade regulamentar para a maioria das vias, presente em apenas 13,1% das arestas (seção 4.2.2), adotou-se uma matriz de velocidades teóricas de projeto por hierarquia funcional: 70 km/h em arteriais principais, 60 km/h em primárias, 50 km/h em secundárias, 40 km/h em terciárias, 30 km/h em residenciais e 20 km/h em vias locais, de serviço e de terra; às classes sem valor específico atribuiu-se 30 km/h.

A plausibilidade dessas velocidades foi aferida por comparação com as medianas regulamentares disponíveis na *Overture Maps* (Tabela 4): os valores teóricos situaram-se, em geral, abaixo ou no nível das medianas observadas, por exemplo 30 contra 40 km/h nas residenciais, 40 contra 60 km/h nas terciárias e 70 contra 80 km/h nas arteriais principais, o que conferiu ao modelo um caráter deliberadamente conservador já antes da aplicação do fator de atrito.

Tabela 4 - Calibração das velocidades teóricas de projeto frente às medianas regulamentares (*Overture Maps*), por classe funcional.

Classe	Velocidade Teórica (km/h)	Observada (<i>Overture</i>) (km/h)
Vias Compartilhadas	20	20
Primária	60	60
Residencial	30	40
Secundária	50	60
Serviço	20	20
Terciária	40	60

Fonte: *Overture Maps* (2026)

Os limites de velocidade regulamentar adotados distanciaram-se de concepções teóricas idealizadas para assumir uma postura metodológica deliberadamente conservadora e protetiva. Em vez de se apoiar nas velocidades máximas teóricas permitidas pelo Código de Trânsito Brasileiro, a rede de transporte motorizado foi calibrada com velocidades de projeto significativamente inferiores às regulamentares registradas na base de dados *Overture Maps*. Essa escolha assegura que o modelo não superestime o alcance do automóvel, incorporando a lentidão natural induzida pelo próprio desenho urbano das vias residenciais e locais, que foram parametrizadas a 30 km/h e 20 km/h, respectivamente

Manteve-se a classe de serviço como percorrível pelo automóvel, à velocidade reduzida de 20 km/h. A decisão envolve um compromisso metodológico: embora parte dessas vias corresponda a acessos internos sem função de travessia (corredores de estacionamento de supermercados e shoppings), parcela relevante representa o arruamento interno de condomínios residenciais, mapeado sob essa classe, que constitui o único acesso viário de sua população. A exclusão integral desconectaria esses residentes da rede e subestimaria sua acessibilidade às UBS, distorção mais grave, para os fins deste estudo, do que o risco de roteamento oportunista por corredores de estacionamento, já mitigado pela baixa velocidade atribuída. Registra-se como limitação a impossibilidade de distinguir automaticamente, na base colaborativa, os dois usos da classe serviço.

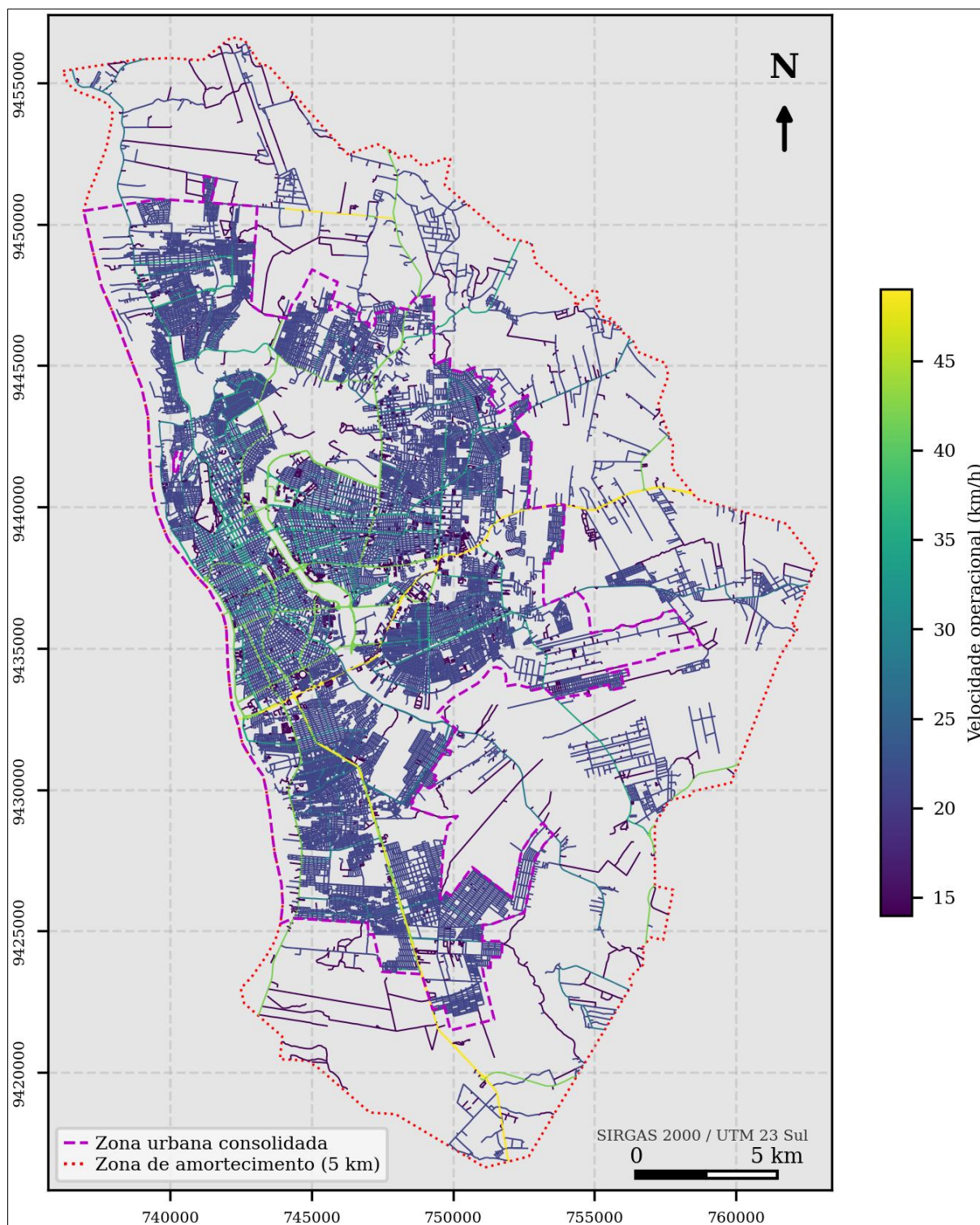
A dinâmica do deslocamento motorizado foi aproximada do cotidiano real do trânsito por meio da aplicação de um fator de fricção urbana global de 0,70, equivalente a uma redução linear de 30% sobre todas as velocidades de projeto. Esse fator de atrito desempenha um papel conceitual nobre: ele simula a fadiga e os retardos inevitáveis que o motorista enfrenta em seu trajeto, tais como cruzamentos sem preferencial, controle semaforico, lombadas, travessia de pedestres e o congestionamento local. Inspirada no modelo metodológico de Campanelli *et al.* (Campanelli *et al.*, 2026), essa penalização reconhece que o automóvel não se desloca em fluxo livre contínuo, impedindo que velocidades nominalmente elevadas mascarem as barreiras operacionais crônicas de Teresina (Figura 20).

A impedância de cada aresta foi obtida pela razão entre a extensão do segmento e a respectiva velocidade ajustada, conforme a Equação 9:

$$t_{ij} = \left(\frac{d_{ij}}{v_{ij}} \right) \times 60 \quad \text{Equação 9,}$$

em: t_{ij} é a impedância (minutos), d_{ij} é a extensão do trecho e v_{ij} é a velocidade do modo no trecho da via (km/h).

Figura 20 - Velocidade operacional do automóvel após o fator de atrito urbano, zona urbana de Teresina.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com dados da Overture Maps Foundation.

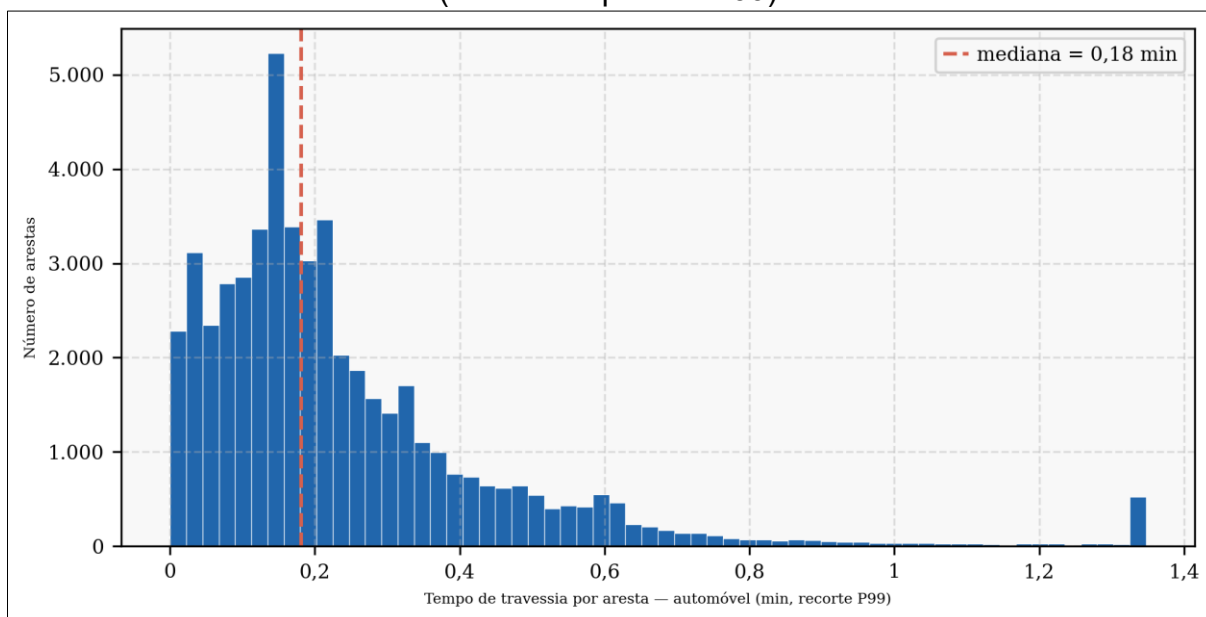
As restrições de circulação por modo foram impostas atribuindo-se impedância infinita às arestas incompatíveis, sem remover arestas (preservando a topologia): o automóvel foi proibido em vias exclusivas de pedestres, calçadas, trilhas, escadarias e ciclovias, e o pedestre, em vias expressas (*motorway*) e arteriais principais (*trunk*).

A mobilidade ativa do pedestre foi modelada sob uma velocidade de caminhada constante de 4,8 km/h (aproximadamente 1,33 metros por segundo), padrão internacional para simulação de deslocamentos a pé. Essa constante reflete o ritmo de passada de um pedestre médio em vias públicas com calçamento urbano. Embora a literatura reconheça variações biológicas significativas baseadas na idade, presença de patologias ou gestação, a fixação de um limiar uniforme de velocidade permite que a acessibilidade ativa funcione como um indicador robusto e comparável de “caminhabilidade” territorial. Esse parâmetro revela se o desenho urbano de Teresina acolhe ou exclui o cidadão que se desloca com as próprias pernas

A decisão de não aplicar fatores de fricção ou custos terminais ao modo pedestre constitui uma escolha metodológica coerente com a própria natureza física do caminhar. Ao contrário do motorista, o pedestre goza de um deslocamento verdadeiramente de porta a porta, isto é, ele inicia o trajeto imediatamente ao cruzar o limite do domicílio e finaliza-o ao adentrar a recepção da UBS, sem necessidade de busca por vagas ou estacionamento. Ademais, o pedestre é imune ao congestionamento de tráfego motorizado e possui maior flexibilidade para transpor pequenas barreiras de fluxo, o que justifica manter seu tempo de viagem livre de penalizações artificiais. A única e real fricção do pedestre é a impedância física de sua própria energia metabólica diante do tempo e da distância sob o clima local, fatores já plenamente capturados pelo decaimento gaussiano do método AE2SFCA.

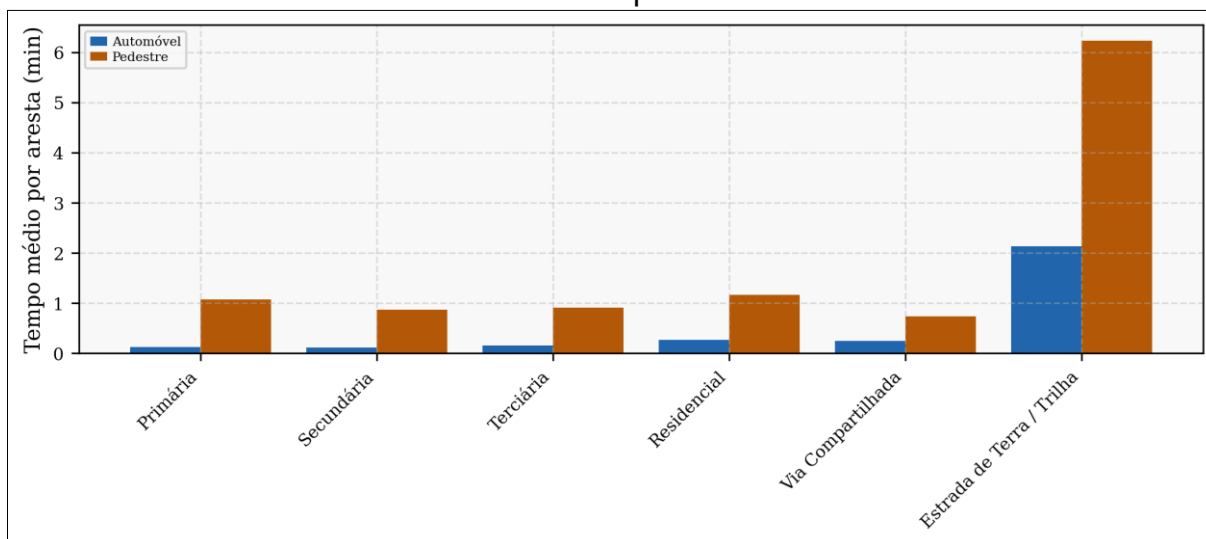
O procedimento resultou em 51.181 arestas dirigíveis e 52.464 andáveis, das 52.977 da malha, com tempo médio de travessia por aresta de 0,25 minuto no automóvel (Figura 21) e 1,13 minuto a pé; a diferença por classe funcional entre os modos é detalhada na Figura 22. A rede com as impedâncias foi validada quanto à finitude e à não negatividade dos tempos e exportada em formato *GeoParquet*, constituindo o grafo roteável para a geração das isócronas (seção 4.2.5).

Figura 21 - Distribuição do tempo de travessia por aresta no modo automóvel (recorte no percentil 99)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 22 – Tempo médio de travessia por aresta, por classe funcional, nos modos automóvel e pedestre.



Fonte: *Overture Maps* (2026); IBGE (2022). Elaborado pelo autor (2026).

4.2.5 Geração das Isócronas e Abrangência Espacial

A espacialização da acessibilidade foi realizada por meio da projeção de isócronas, isto é, polígonos que delimitam a área máxima alcançável a partir de um ponto de origem dentro de um dado intervalo de tempo (Apêndice G, Notebook 04.1). Geraram-se isócronas centradas em cada Unidade Básica de Saúde (UBS) da área de estudo, nos modos automóvel e pedestre, balizadas pelos limiares de 10, 20 e 30

minutos, em conformidade com a modelagem de decaimento por distância do método AE2SFCA.

O roteamento operou sobre o grafo de impedâncias produzido na etapa anterior (Seção 4.2.4). Como cada modo percorre uma sub-rede distinta, construiu-se uma rede de roteamento por modo, restando-se apenas as arestas de tempo de percurso finito: descartaram-se, no modo automóvel, as vias exclusivas de pedestres (calçadas, escadarias, ciclovias e trilhas) e, no modo pedestre, as vias expressas (rodovias e arteriais principais), às quais se atribuiu impedância infinita. Dessa forma, o cálculo dos alcances incidiu somente sobre a malha efetivamente percorrível por cada modo.

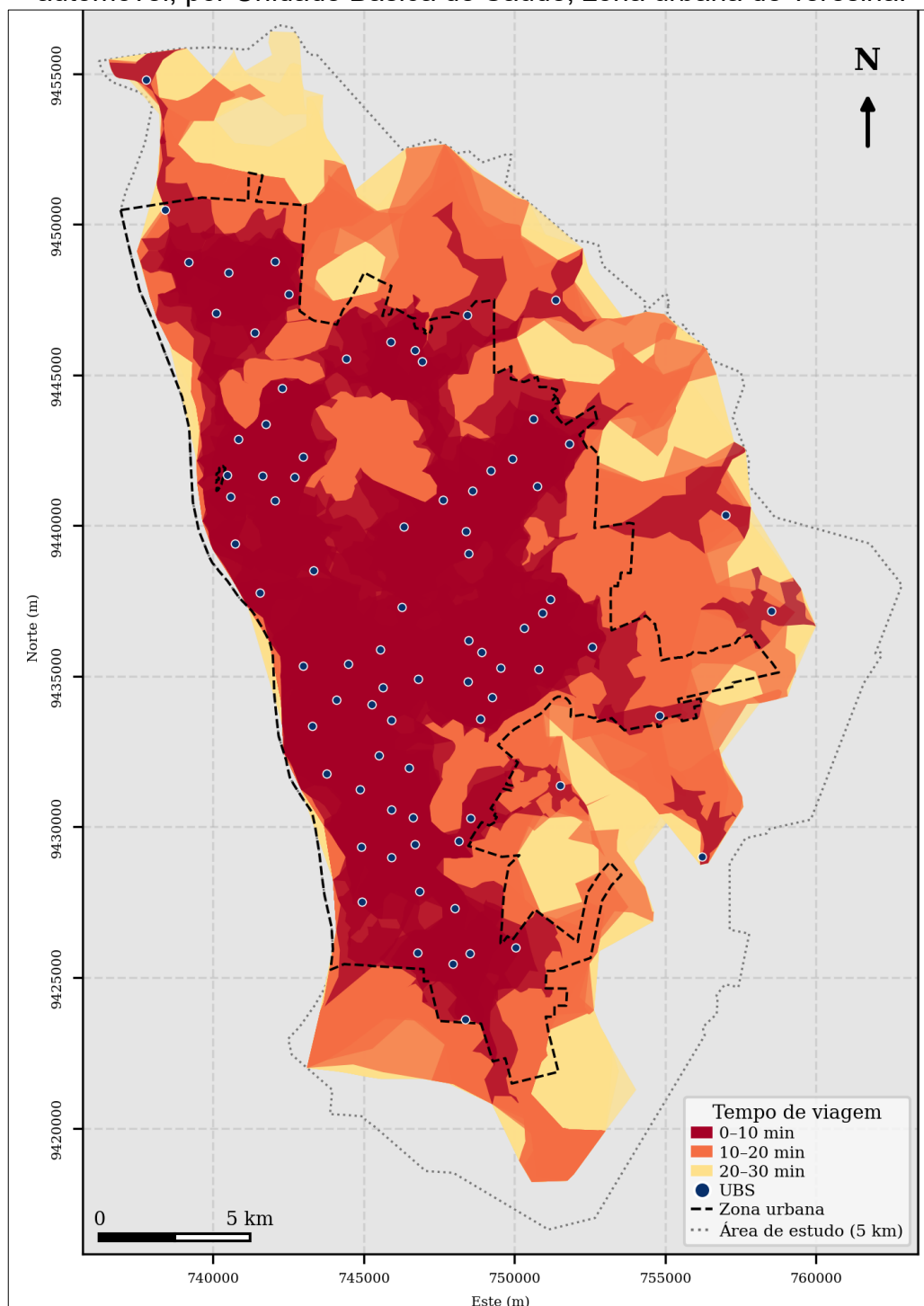
O automóvel é frequentemente idealizado como um meio de transporte de porta a porta, uma premissa que ignora as barreiras físicas que ocorrem estritamente no encerramento da viagem. Para humanizar essa simulação e neutralizar essa fantasia de eficiência instantânea, implementou-se um custo de terminal fixo de 4 minutos deduzido diretamente do orçamento de tempo das isócronas motorizadas. Essa penalidade emula de maneira fidedigna o tempo despendido pelo usuário para desacelerar o veículo nas imediações de uma Unidade Básica de Saúde, buscar uma vaga de estacionamento segura na via pública e realizar o deslocamento a pé final até o balcão de atendimento. Sob essa ótica, as faixas isócronas de 10, 20 e 30 minutos por automóvel foram comprimidas para 6, 16 e 26 minutos efetivos de fluxo na rede viária, descontando o privilégio do veículo particular.

A extração geométrica das áreas de abrangência foi processada com a biblioteca *city2graph*, adotando-se o método de envoltório côncavo na variante *alpha* (parâmetro *hull_ratio* = 0,15). Diferentemente do envoltório convexo (*convex hull*), propensa a englobar barreiras intransponíveis e quarteirões sem arruamento, a envoltória côncava contorna estritamente os nós da rede efetivamente alcançados, mitigando a superestimação da oferta.

Para assegurar a correta aplicação dos pesos de decaimento (W_i) na formulação do AE2SFCA, as áreas de abrangência foram processadas sob a lógica de anéis mutuamente exclusivos. Mediante operações topológicas de diferença geométrica, subtraiu-se de cada polígono o polígono do limiar imediatamente anterior, convertendo as isócronas cumulativas em faixas independentes (0-10, 10-20 e 20-30 minutos). Esse procedimento evitou a sobreposição espacial e a consequente dupla contagem da demanda populacional nos setores mais próximos às unidades.

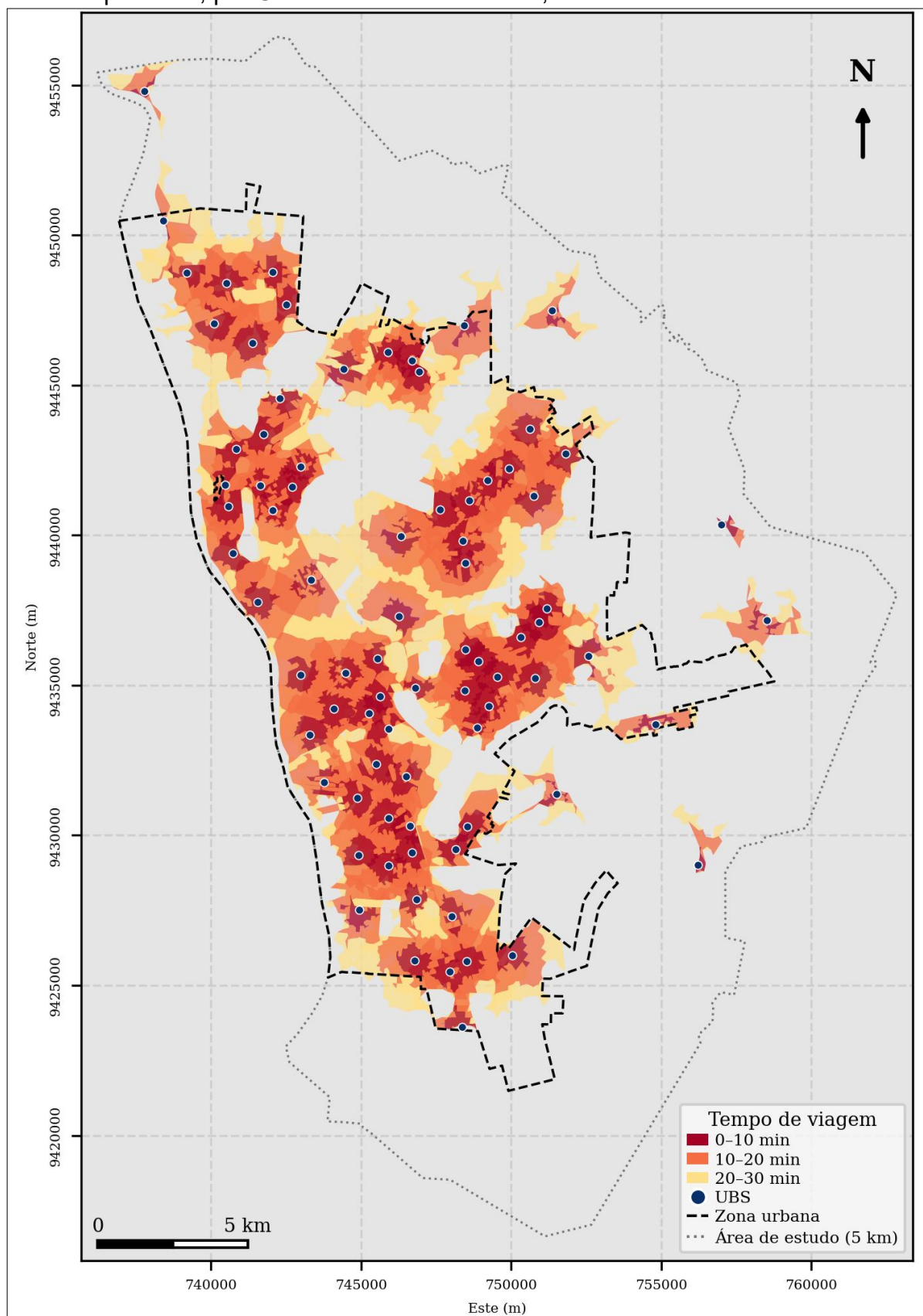
As Figuras 23 e 24 apresentam as faixas isócronas resultantes para os modos automóvel e pedestre, respectivamente, recortadas à zona urbana para fins de apresentação. Nota-se, já em inspeção visual, o alcance expressivamente menor do deslocamento a pé, restrito às imediações de cada unidade, em contraste com a ampla cobertura motorizada (diferença quantificada na Seção 5.4).

Figura 23 - Áreas de abrangência (isócronas) de 10, 20 e 30 minutos no modo automóvel, por Unidade Básica de Saúde, zona urbana de Teresina.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com dados da Overture Maps Foundation, IBGE e CNES.

Figura 24 - Áreas de abrangência (isócronas) de 10, 20 e 30 minutos no modo pedestre, por Unidade Básica de Saúde, zona urbana de Teresina.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com dados da Overture Maps Foundation, IBGE e CNES.

Essas definições operacionais de impedância ganham profundidade humana e social quando conectadas diretamente aos modelos de Penchansky e Thomas (1981) e Levesque *et al.* (2013). No contexto de um sistema universal como o SUS, onde a barreira financeira direta da consulta é eliminada, a iniquidade de acesso desloca-se para a dimensão da Capacidade de Pagamento (*Affordability*) por meio dos custos indiretos de transporte. A introdução de fricções urbanas e custos terminais demonstra que a dependência forçada do automóvel impõe barreiras de tempo e de dinheiro que as famílias periféricas de baixa renda de Teresina não conseguem absorver. Assim, ao calibrar o modelo para refletir as reais dificuldades de trânsito e o privilégio motorizado, a pesquisa deixa de medir apenas distâncias geométricas e passa a cartografar a exclusão e a iniquidade social na atenção primária

4.2.6 Cálculo do Índice de Acessibilidade AE2SFCA

O índice de acessibilidade foi calculado pelo método AE2SFCA, na formulação de Michels *et al.* (2024), reproduzindo-se a implementação de referência disponibilizada pelos autores³ (Apêndice H, Notebook 05.1). O procedimento desenvolve-se em dois passos. No primeiro passo, para cada Unidade Básica de Saúde j , computou-se a razão oferta-demanda $R_j = S_j / D_j$, em que a demanda D_j resulta do somatório, sobre todos os setores alcançados, da população setorial ponderada por dois fatores: a fração de área do setor contida em cada faixa isócrona - obtida por interseção geométrica (overlay) entre os anéis e os polígonos setoriais, e limitada superiormente à unidade para conter erros de ponto flutuante - e o peso de decaimento gaussiano da faixa, igual a 1,00, 0,68 e 0,22 para os anéis de 0-10, 10-20 e 20-30 minutos (Luo; Qi, 2009). A oferta S_j foi quantificada pelo número de equipes de Atenção Primária ativas (Saúde da Família e Atenção Primária) de cada unidade, extraído do CNES; seguindo a regra de Michels *et al.*, as unidades sem equipe ativa ($S_j \leq 0$) foram descartadas do cálculo. Consideraram-se as 81 UBS da área de estudo (75 na zona urbana e 6 na faixa de amortecimento), que reúnem 474 equipes.

No segundo passo, a acessibilidade de cada setor censitário i foi obtida pelo somatório das razões R_j de todas as unidades que o alcançam dentro do limiar de 30 minutos, novamente ponderadas pela fração areal e pelo peso de decaimento da faixa

³ <https://github.com/cybergis/A2SFCA>

que conecta o setor à unidade. Essa formulação substitui a inclusão por centroide pela repartição areal da demanda, eliminando a premissa de que toda a população reside no ponto central do setor - distorção especialmente crítica nos setores periféricos de grande extensão. O índice foi expresso em equipes de Atenção Primária por 10 mil habitantes, unidade interpretável e comparável a parâmetros de dimensionamento da APS.

Os setores cujo índice se situou no quartil inferior da distribuição (os 25% de pior acesso, calculados sobre os setores com acesso positivo) foram classificados, em caráter operacional, como "desertos de saúde" (critério transparente e ajustável). O cálculo foi conduzido de forma independente para os modos automóvel e pedestre, gerando dois índices e duas classificações de desertos por setor.

4.2.6.1 Comparação com a Abordagem Tradicional

Para o teste da hipótese metodológica (H_2), o índice areal foi confrontado com o E2SFCA tradicional (Luo; Qi, 2009), no qual cada setor é representado por seu centroide e sua população atribuída integralmente à faixa isócrona que o contém, operacionalizada por junção espacial (Apêndices H e J, Notebooks 05.1 e 06.1). Ambos os índices foram implementados sob idêntica parametrização, isto é, mesmas faixas isócronas, mesmos pesos de decaimento e mesma camada de oferta, isolando como única fonte de variação a forma de agregação da demanda (areal versus centroide). A concordância entre os dois diagnósticos foi avaliada pela correlação de postos de *Spearman* e pela quantificação dos setores que trocam de classificação de "deserto de saúde" entre as abordagens.

4.2.7 Análise da Desigualdade Socioespacial

Para o teste da hipótese territorial (H_1), o índice de acessibilidade AE2SFCA por setor censitário foi cruzado com a renda mediana do responsável pelo domicílio, obtida dos microdados do Censo Demográfico de 2022 (IBGE) (Apêndice J, Notebook 06.1). Adotou-se a mediana, e não a média, por ser estatística resistente à forte assimetria da renda demonstrada na seção 5.1, evitando a distorção imposta pelos hot-spots de riqueza. A associação global foi mensurada pelo coeficiente de correlação de *Spearman* (ρ), robusto a distribuições não normais. Para verificar o

padrão de exclusão concentrado na periferia, aplicaram-se a estatística de autocorrelação espacial bivariada I de Moran e os Indicadores Locais de Associação Espacial (LISA) (Rey; Anselin, 2010), por meio da biblioteca *esda*, identificando agrupamentos significativos de baixa acessibilidade e baixa renda.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CARACTERIZAÇÃO SOCIOECONÔMICA

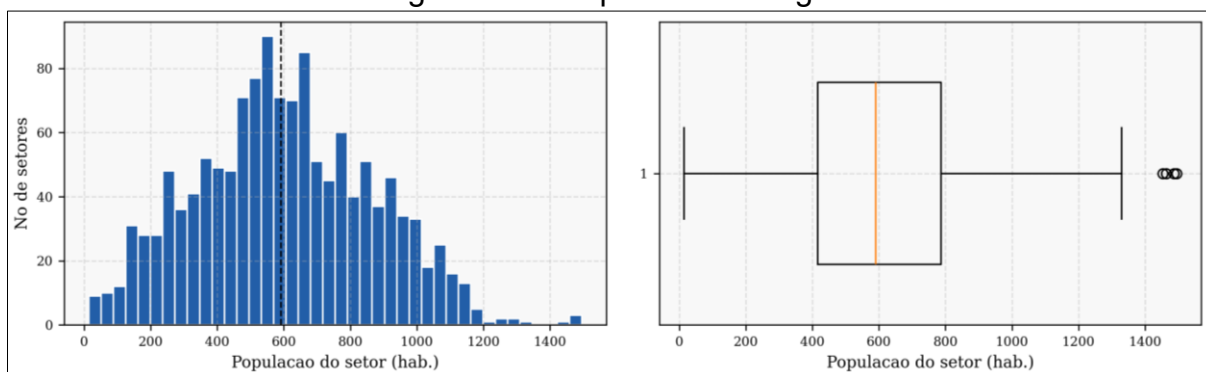
A população residente nos setores censitários da zona urbana de Teresina apresenta uma distribuição estatística aproximadamente simétrica, com coeficiente de assimetria de 0,17 e curtose de -0,37. A consistência desses dados demográficos é evidenciada pela proximidade entre a mediana, de 591 habitantes, e a média, de 602,7 habitantes. A estabilidade demográfica do município é corroborada por um coeficiente de variação moderado de 44% e pela identificação de apenas quatro setores censitários considerados atípicos (*outliers*) (Tabela 5) sob a perspectiva estritamente demográfica. A visualização gráfica desse perfil simétrico está expressa no histograma de frequências e no diagrama de caixa da Figura 25.

Tabela 5 - Medidas de posição, variabilidade e forma das variáveis socioeconômicas dos setores censitários da zona urbana de Teresina.

Medida Estatística	Renda Mediana do Responsável (R\$)	Renda Média do Responsável (R\$)	População Residente (hab.)
Quantidade de setores válidos	1.340,00	1.340,00	1.340,00
Média	2.151,87	2.959,52	602,73
Mediana	1.212,00	1.930,94	591,00
Mínimo	400,00	802,69	14,00
Primeiro quartil (Q1)	1.212,00	1.401,06	416,00
Terceiro quartil (Q3)	2.000,00	3.123,60	786,25
Máximo	19.250,00	19.864,29	1.495,00
Desvio-padrão	2.157,08	2.801,34	265,04
Coeficiente de variação (%)	100,24	94,66	43,97
Amplitude interquartilica (IQR)	788,00	1.722,54	370,25
Limite superior <i>outlier</i> (Q3 + 1,5 IQR)	3.182,00	5.707,41	1.341,62
Nº de <i>outlier</i> superiores	180,00	154,0	4,00
Coeficiente de assimetria	3,77	2,91	0,17
Coeficiente de curtose	17,67	9,86	-0,37

Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com dados do Censo Demográfico 2022 (IBGE).

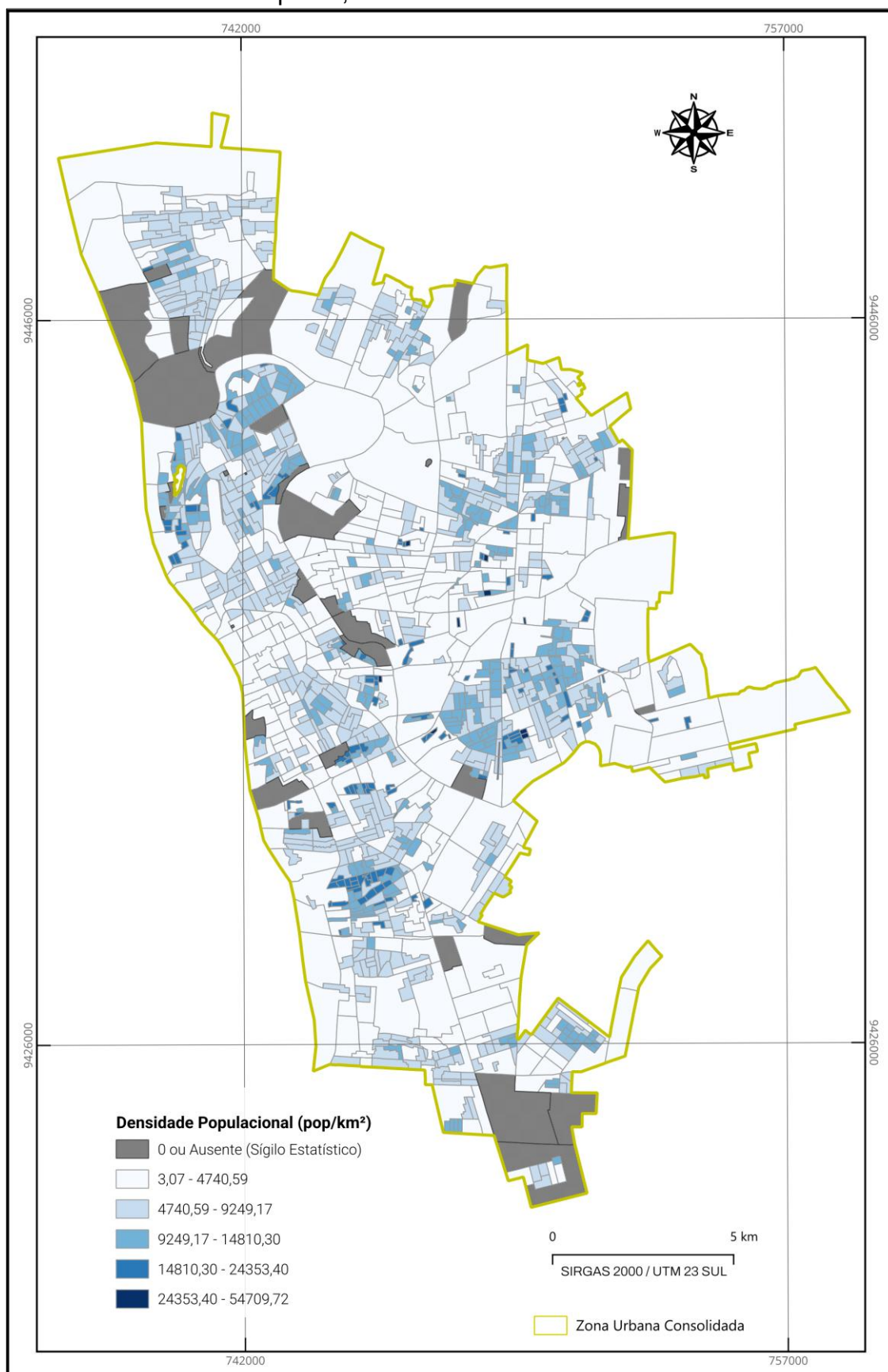
Figura 25 - Distribuição populacional dos setores censitários da zona urbana de Teresina: histograma de frequências e diagrama de caixa



Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com dados do Censo Demográfico 2022 (IBGE).

Essa homogeneidade na contagem populacional absoluta decorre do próprio critério operacional do IBGE, que planeja os setores censitários urbanos para abrigar uma média de 600 habitantes. Contudo, em estrito respeito às normas da gramática cartográfica e para mitigar o viés visual do método coroplético provocado pelas variações de área dos polígonos, o mapeamento espacial da demanda foi operacionalizado pela densidade demográfica (hab/km^2), classificada e organizada em quintis de distribuição (Figura 26). Essa espacialização evidencia que as maiores concentrações populacionais por unidade de área situam-se nos bairros consolidados e intermediários, enquanto os extensos setores das franjas urbanas mantêm densidades reduzidas. A consequência metodológica dessa caracterização é vital para a pesquisa: demonstra-se que as iniquidades de acessibilidade geográfica analisadas nas seções subsequentes não decorrem de vazios demográficos absolutos, mas sim das decisões locacionais da oferta física de saúde e do atrito espacial dos modais de transporte.

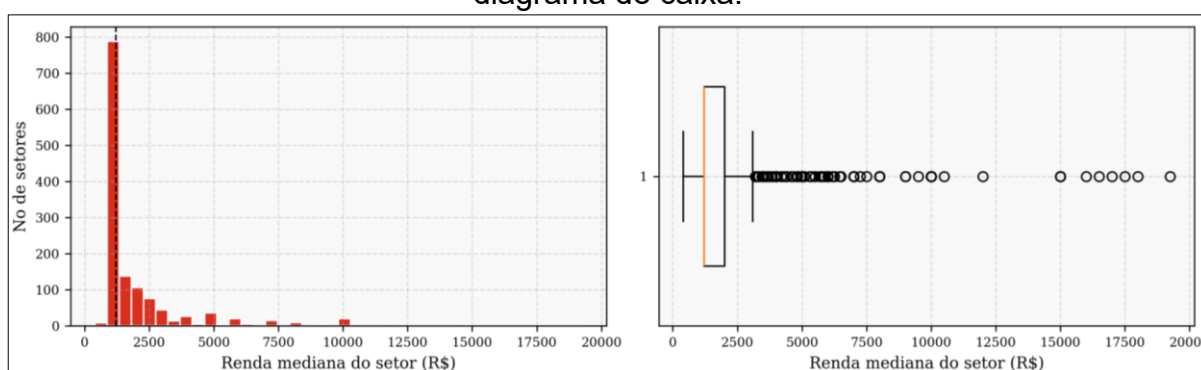
Figura 26 População residente por setor censitário, classificada e espacializada em quintis, zona urbana de Teresina



Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com dados do Censo Demográfico 2022 (IBGE).

O cenário socioeconômico da renda mediana dos responsáveis pelos domicílios, por outro lado, revela forte assimetria à direita, evidenciando o padrão de profunda segregação e desigualdade socioespacial que caracteriza a capital piauiense. Essa forte dispersão é atestada por um coeficiente de assimetria de 3,77, uma curtose elevada de 17,67 e um coeficiente de variação expressivo de 100,2%. A disparidade de rendimentos é tão acentuada que a renda média setorial estimada (R\$ 2.151,87) supera em quase 80% o valor da renda mediana real (R\$ 1.212,00), o qual coincide exatamente com o patamar do primeiro quartil da amostra. O comportamento dessa severa assimetria distributiva é detalhado nas ferramentas estatísticas de visualização da Figura 27.

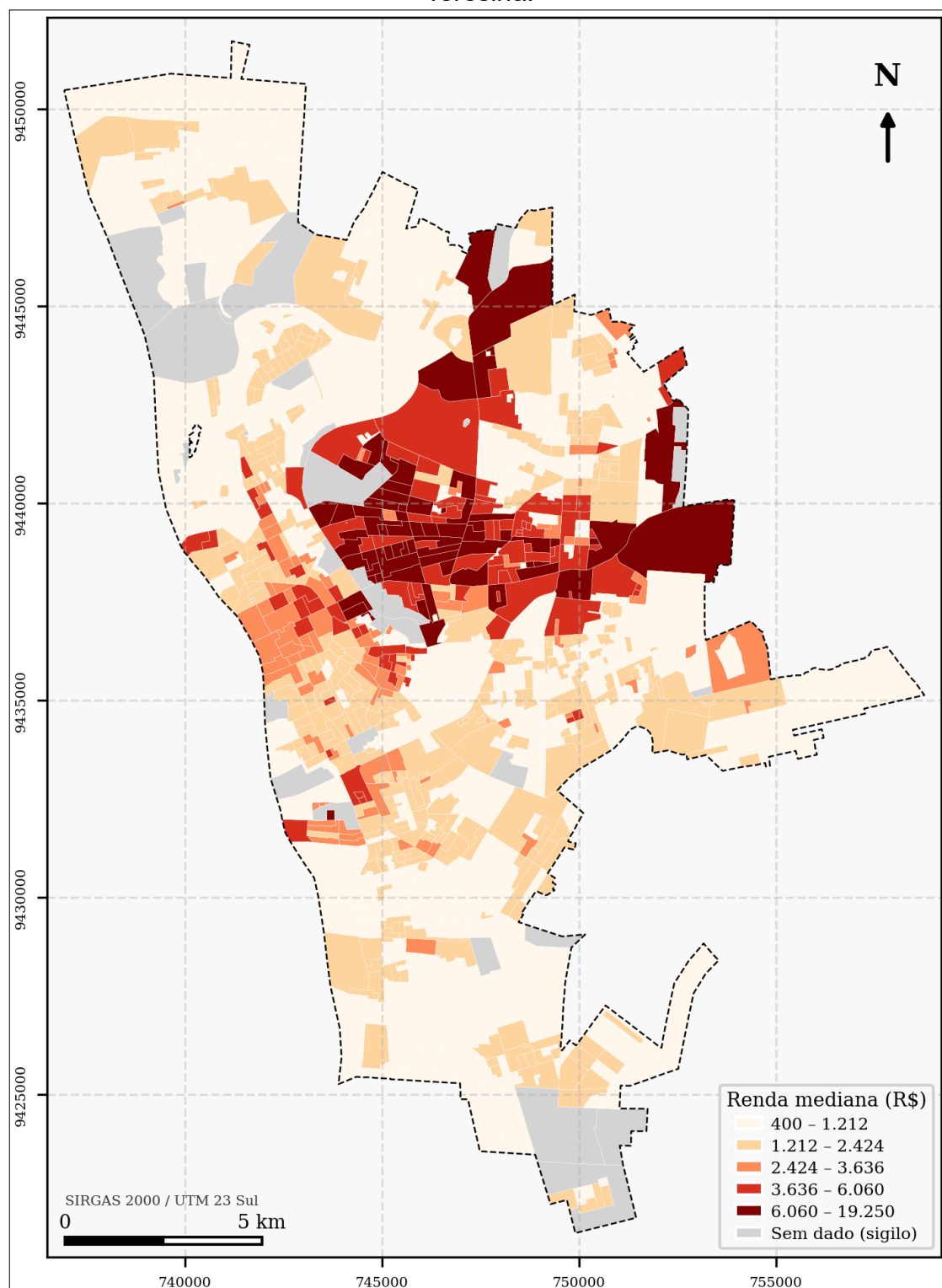
Figura 27 - Distribuição da renda mediana dos responsáveis pelos domicílios dos setores censitários da zona urbana de Teresina: histograma de frequências e diagrama de caixa.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com dados do Censo Demográfico 2022 (IBGE).

A classificação da renda em faixas de múltiplos do salário mínimo de 2022 traduz espacialmente esse abismo socioeconômico, conforme mapeado na Figura 28. Sob essa ótica, 745 setores censitários (55,6% do total de setores válidos) sobrevivem com rendimento nominal mediano de até um salário mínimo, enquanto uma parcela seleta de apenas 69 setores (5,1%) usufrui de rendimentos superiores a cinco salários mínimos. Pelo critério dos limites de aceitação estatística, identificam-se 180 setores considerados outliers de renda (com limite superior de R\$ 3.182,00 e valor máximo registrado de R\$ 19.250,00). Esses bolsões de alta renda configuram hot-spots de riqueza densamente concentrados na região central e nas áreas de maior valorização imobiliária, enquanto a periferia é dominada pela vulnerabilidade econômica. Vale registrar que, dos 1.375 setores urbanos originais, 35 unidades não possuíam dados válidos de renda devido ao sigilo estatístico do IBGE e foram excluídas, restando 1.340 setores válidos para a modelagem espacial.

Figura 28 - Renda mediana do responsável por setor censitário, classificada e espacializada em faixas de múltiplos do salário mínimo (2022), zona urbana de Teresina.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com dados do Censo Demográfico 2022 (IBGE).

Essa discrepância estrutural entre a homogeneidade demográfica da demanda e a acentuada desigualdade socioeconômica de rendimentos justifica a escolha da renda mediana como a estatística de controle no teste da hipótese H_1 . Por tratar-se

de uma variável robusta e resistente à influência de valores extremos, a mediana impede que os *hotspots* de alta renda distorçam a interpretação da realidade do município. A consolidação dessas dimensões demográficas e financeiras está detalhada no quadro estatístico da Tabela 5, servindo de pilar analítico para a compreensão de como a exclusão socioespacial de Teresina se reflete nos tempos e modos de deslocamento para o acesso à Atenção Primária à Saúde.

5.2 CARACTERIZAÇÃO DA OFERTA DE ATENÇÃO PRIMÁRIA

A infraestrutura física e os recursos humanos que compõem a rede de Atenção Primária à Saúde (APS) na área de estudo somam 81 Unidades Básicas de Saúde (UBS) e 474 equipes de profissionais ativos. Desse total de pontos de oferta, 75 unidades localizam-se estritamente dentro do perímetro urbano e 6 atuam na faixa de amortecimento (*buffer* de 5 km), ao passo que as 12 unidades rurais restantes do município foram descartadas por estarem fora do envelope de cálculo da mancha urbana. Essa caracterização inicial e as métricas de dispersão dos recursos de saúde estão sintetizadas na Tabela 6, que funciona como auditoria de consistência antes da execução da modelagem espacial.

Tabela 6 - Síntese da oferta de Atenção Primária (UBS e equipes de APS), área de estudo.

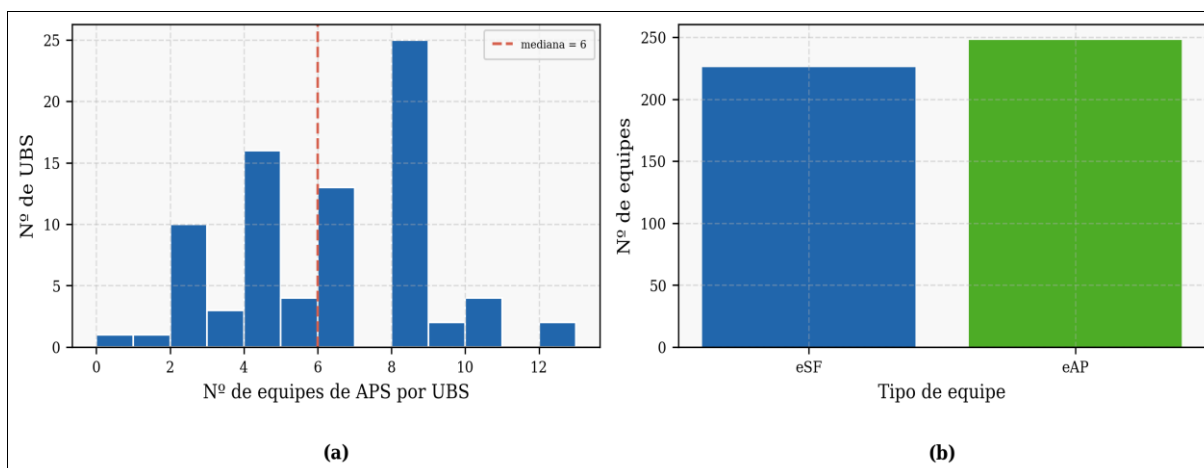
Categoria Analítica	Indicador de Infraestrutura e Recursos	Unidade de Medida	Valor Obtido
Pontos de Oferta	Unidades Básicas de Saúde (UBS) na área de estudo	Unidades	81
	UBS situadas no perímetro urbano consolidado	Unidades	75
	UBS situadas na zona de amortecimento (5 km)	Unidades	6
	UBS ativas sem equipes registradas no CNES	Unidades	1
Capacidade e Equipes	Força de trabalho total em Atenção Primária (APS)	Equipes	474
	Equipes de Saúde da Família (eSF - Tipo 71)	Equipes	226
	Equipes de Atenção Primária (eAP - Tipo 70)	Equipes	248

Categoria Analítica	Indicador de Infraestrutura e Recursos	Unidade de Medida	Valor Obtido
Dispersão da Oferta	Média de equipes de APS por UBS	Equipes/UBS	5,85
	Mediana de equipes de APS por UBS	Equipes/UBS	6
	Desvio-padrão de equipes por UBS	Equipes/UBS	2,67
	Coeficiente de Variação da oferta por unidade		45,5
	Capacidade mínima de equipes registrada em uma UBS	Equipes	0,0
	Primeiro quartil (Q1) da capacidade por UBS	Equipes	4
	Terceiro quartil (Q3) da capacidade por UBS	Equipes	8
	Capacidade máxima de equipes registrada em uma UBS	Equipes	12
Relação Oferta-Demanda	População residente na zona urbana de Teresina	Habitantes	807.660
	Razão agregada de equipes por habitante	Equipes / 10 mil hab.	5,87

Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com dados do CNES/DataSUS (2026) e da Secretaria Municipal de Planejamento e Coordenação de Teresina (SEMPPLAN).

A capacidade instalada das unidades apresenta moderada dispersão territorial, com média de 5,85 e mediana de 6,00 equipes por UBS, oscilando desde unidades sem equipes ativas até pontos com capacidade máxima de 12 equipes. A distribuição dessa força de trabalho e a proporção de cada modalidade de equipe estão representadas graficamente na Figura 29 (a) e (b). Os dados apontam que a rede urbana possui um equilíbrio entre as 226 Equipes de Saúde da Família (eSF, tipo 71) e as 248 Equipes de Atenção Primária (eAP, tipo 70), revelando um esforço de consolidação de pessoal que, contudo, carece de simetria em sua distribuição geográfica pelas unidades

Figura 29 – (a) distribuição do nº de equipes por UBS; (b) composição por tipo de equipe



Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com dados do CNES/DataSUS (2026) e da Secretaria Municipal de Planejamento e Coordenação de Teresina (SEMPPLAN).

A análise da suficiência agregada revela uma relação confortável entre oferta e demanda, registrando a marca de 5,87 equipes de APS para cada 10 mil habitantes urbanos (o equivalente a 1.704 habitantes por equipe), patamar condizente com as diretrizes de dimensionamento da APS. Sob a ótica de planejamento em saúde, essa suficiência global é um achado de grande relevância metodológica, pois prova que os eventuais problemas de acesso verificado em Teresina não decorrem de escassez absoluta de equipes. Esse comportamento empírico corrobora as distinções conceituais de Gulliford *et al.* (2002) entre a simples disponibilidade burocrática (“ter acesso”) e a viabilidade real de utilização (“obter acesso”), a qual depende de superar as barreiras geográficas.

A repartição espacial desses recursos pelas regionais administrativas, contudo, expõe a forte concentração e assimetria que caracterizam a oferta de saúde no município. Conforme detalhado na Tabela 7, a regional Sul lidera a oferta concentrando 28 UBS e 156 equipes (32,9% do total), seguida de perto pela regional Norte, com 21 UBS e 139 equipes (29,3%). Em contrapartida, as regionais Leste e Sudeste aparecem em patamar inferior, abrigando 16 unidades cada e somando, respectivamente, 91 (19,2%) e 88 (18,6%) equipes em atividade. Esse cenário de desigualdade territorial reforça que a capacidade instalada agregada perde eficácia quando desvinculada de um planejamento espacial sensível à localização dos usuários.

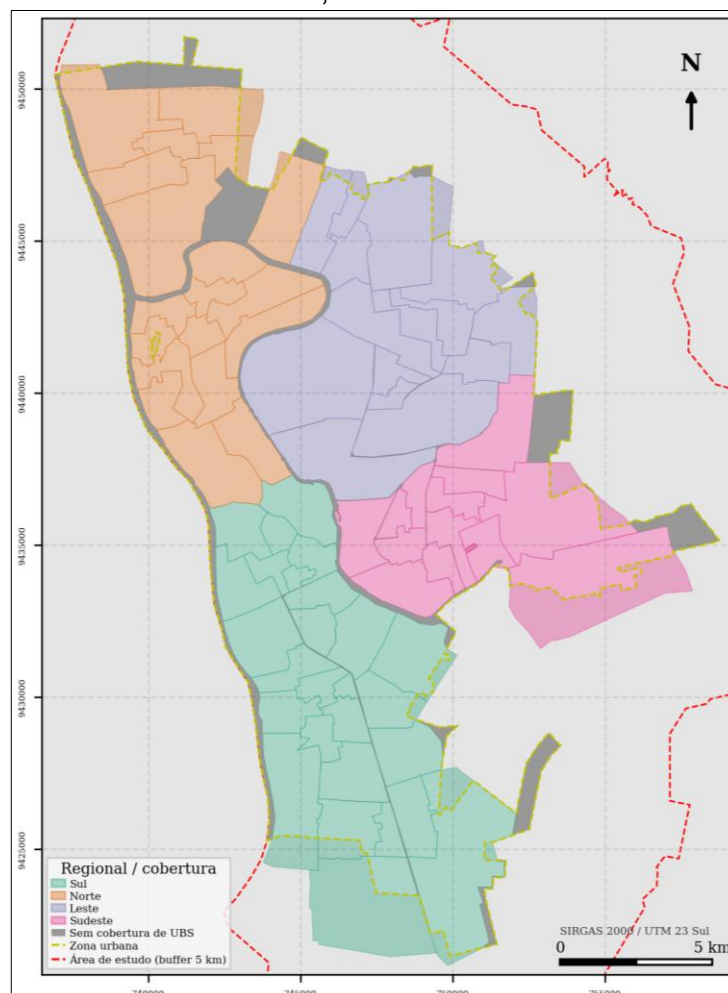
Tabela 7 - Oferta de Atenção Primária por regional administrativa de saúde.

Regional	Quantidade de UBS	Quantidade de equipes	Média de Equipes	eSF	eAP	% equipes
Sul	28	156	5,6	73	83	32,9
Norte	21	139	6,6	68	71	29,3
Leste	16	91	5,7	45	46	19,2
Sudeste	16	88	5,5	40	48	18,6

Fonte: CNES/DataSUS (2026) e Prefeitura Municipal de Teresina. Elaborado pelo autor (2026).

O diagnóstico da capacidade da rede é complementado pela cobertura formal atribuída às equipes de Saúde da Família. As 240 áreas de adscrição territorial das eSF, vinculadas a 74 UBS, recobrem formalmente 87,2% do perímetro urbano de Teresina, alcançando uma estimativa de 97,3% da população residente. O contingente demográfico desassistido é residual, limitando-se a aproximadamente 22 mil habitantes (2,7%) dispersos em 18 setores censitários periféricos desprovidos de vínculo formal de Atenção Básica, como ilustrado no mapeamento da Figura 30.

Figura 30 - Áreas de atuação das equipes de Saúde da Família e lacunas de cobertura territorial, zona urbana de Teresina.



Fonte: Prefeitura Municipal de Teresina (SEAMPLAM); IBGE. Elaborado pelo autor (2026).

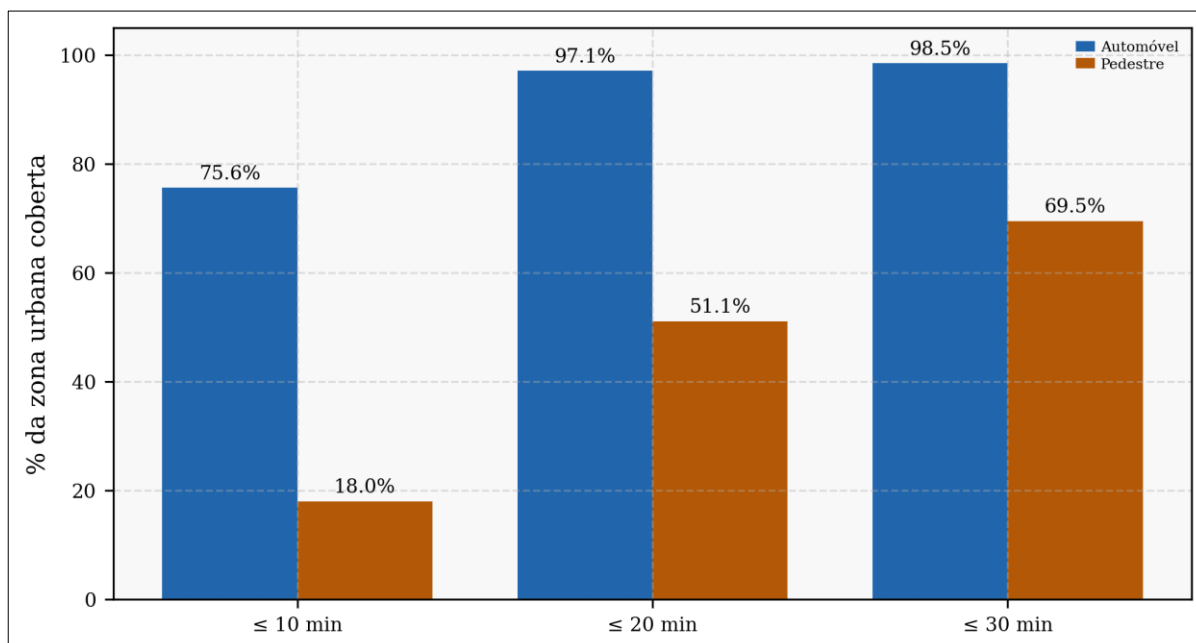
A distinção conceitual entre essa cobertura jurídica e a acessibilidade geográfica real, no entanto, constitui um dos eixos mais ricos deste trabalho. A cobertura administrativa declarada em mapas expressa apenas uma vinculação burocrática de território, ignorando as barreiras físicas, os tempos reais de tráfego na rede viária e o efeito de concorrência demográfica sobre a oferta. Como será revelado pela modelagem do índice AE2SFCA nas seções seguintes, o modelo espacial identifica setores classificados como desertos de saúde mesmo dentro de áreas formalmente cobertas por equipes, evidenciando que a adscrição administrativa, por si só, não é garantia de acessibilidade geográfica efetiva.

5.3 CARACTERIZAÇÃO DA REDE VIÁRIA E DA ACESSIBILIDADE FÍSICA

A infraestrutura viária que suporta os deslocamentos de saúde em Teresina totaliza 4.817,7 quilômetros de extensão, estruturados em uma rede analítica composta por 52.977 arestas e 35.187 nós de interseção. A expressiva densidade viária urbana, registrada no patamar de 15,29 km/km², é integrada por uma malha altamente coesa, na qual 99,37% de seus nós se encontram conectados ao componente gigante do grafo. Essa continuidade topológica é metodologicamente vital, pois assegura que as simulações de roteamento multimodal ocorram livres de descontinuidades artificiais ou de isolamentos que fragmentariam o cálculo das áreas de abrangência

O alcance territorial das Unidades Básicas de Saúde exibe uma assimetria profunda entre os modos ativo e motorizado, conforme ilustrado no perfil de cobertura temporal da Figura 31. No cenário veicular, as áreas de abrangência física acumuladas em até 30 minutos de viagem alcançam uma cobertura quase universal, correspondendo a 98,5% da mancha urbana consolidada de Teresina. Em contrapartida, a mobilidade ativa por caminhada revela-se severamente restrita, limitando o acesso a pé em até 30 minutos de deslocamento a apenas 69,5% da superfície urbana municipal.

Figura 31 - Proporção da zona urbana coberta por faixa de tempo de viagem, nos modos automóvel e pedestre.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Essa disparidade multimodal constitui um achado de grande relevância empírica, revelando que as iniquidades crônicas de acesso em Teresina tendem a se manifestar sob a dependência direta da caminhada. Todavia, essa abrangência espacial inicial representa uma medida meramente física e geométrica de alcance, indicando apenas se um ponto de oferta é geograficamente atingível no tempo-limite. Para qualificar de forma real o acesso, faz-se indispensável ponderar a capacidade instalada das equipes e a concorrência espacial da demanda demográfica, dimensões que são plenamente incorporadas pela modelagem do índice AE2SFCA nas seções seguintes.

5.4 ÍNDICE DE ACESSIBILIDADE AE2SFCA (CARRO E PEDESTRE)

No modo automóvel, o índice de acessibilidade apresentou-se elevado e espacialmente bem distribuído: todos os 1.375 setores registraram acesso positivo, com mediana de 6,09 e média de 5,85 equipes de APS por 10 mil habitantes, variando de 1,05 a 8,33 e com coeficiente de variação moderado (25,3%). A média ligeiramente inferior à mediana indica assimetria à esquerda, isto é, uma cauda de setores de baixo acesso que puxa a distribuição para baixo, ou seja, é coerente com a existência de franjas periféricas mal servidas, ainda que nenhum setor fique inteiramente desassistido pelo automóvel.

No modo pedestre, o quadro é qualitativamente distinto e mais desigual. Dezoito setores não dispõem de qualquer acesso a pé (1.357 com acesso positivo), e a distribuição, embora apresente mediana semelhante (5,79), é fortemente influenciada por valores extremos: o coeficiente de variação atinge 81,6% e o máximo chega a 145,63 equipes por 10 mil habitantes. Esse valor, todavia, constitui um artefato do método e não um acesso real elevado: trata-se de um setor periférico (206 habitantes) alcançável a pé por uma única unidade cuja área de captação pedestre é diminuta, de modo que a escassa demanda concorrente infla artificialmente a razão oferta-demanda. A robustez da leitura é assegurada pelos percentis: o 99º situa-se em 10,39 e apenas dois setores superam 20. De sorte que a mediana (5,79) é a medida de tendência central adequada para o modo a pé. Esse comportamento ilustra uma limitação conhecida dos métodos de captação flutuante: a sensibilidade a denominadores de demanda muito pequenos nas bordas da rede percorrível.

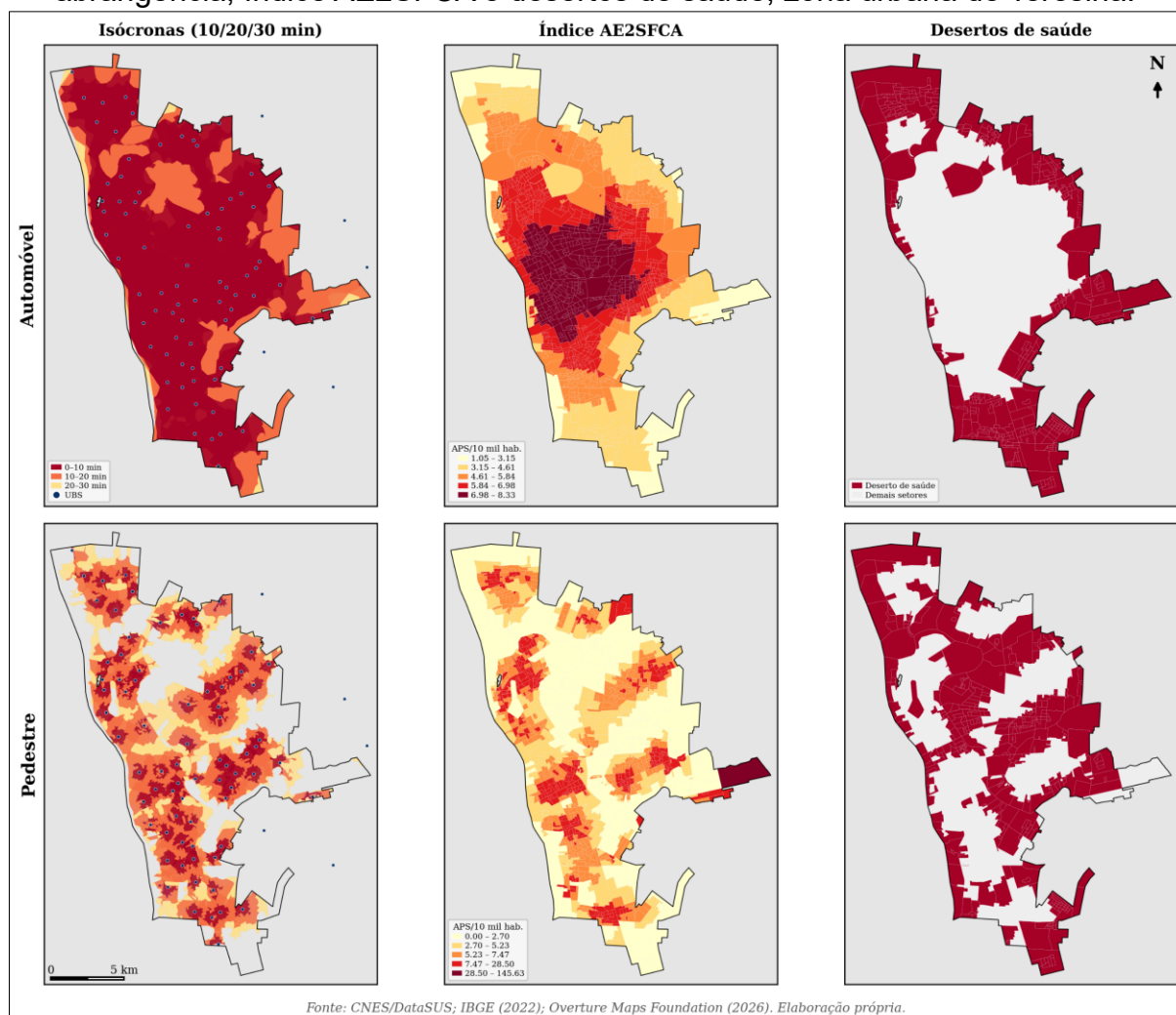
A contagem de desertos é, isoladamente, pouco informativa para o contraste entre modos: por se definirem como o quartil inferior da distribuição, os desertos somam, por construção, cerca de 25% dos setores em qualquer modo: 344 no automóvel (25,0%) e 358 a pé (26,0%). A paridade dos números, contudo, mascara uma profunda disparidade de cobertura territorial. Decompondo o resultado a pé, identificam-se 340 desertos relativos (entre os setores atendidos, os 25% de pior acesso) e 18 desertos absolutos (setores sem qualquer alcance a pé) - categoria inexistente no automóvel, em que todos os 1.375 setores registram acesso positivo. Sobretudo, a área ocupada pela privação é substancialmente maior no modo pedestre: os desertos a pé recobrem 57,9% do território urbano, contra 48,1% no automóvel.

Difere também o padrão espacial: enquanto os desertos do automóvel formam um anel periférico compacto e distante (em média a $10,1 \pm 2,5$ km do centro), os desertos a pé dispersam-se por toda a malha ($6,3 \pm 3,7$ km do centro), pulverizados nos interstícios entre as áreas de captação das unidades. Em síntese, a privação de acesso motorizado é um fenômeno de borda, ao passo que a privação a pé é difusa e territorialmente mais extensa, ainda que o número de setores afetados seja semelhante.

A Figura 32 sintetiza, em um painel comparativo, as três representações do fenômeno (áreas de abrangência, índice e desertos) para os dois modos. A leitura horizontal evidencia a cadeia "alcance físico → oferta relativa → falha de acesso"; a

vertical contrasta os modos: enquanto o acesso motorizado é contínuo e estruturado, o acesso a pé é fragmentado, restrito às vizinhanças imediatas das unidades e pontilhado por vazios intersticiais. A Tabela 8 consolida as medidas de posição, dispersão e o número de desertos por modo.

Figura 32 - Acessibilidade às UBS por modo de deslocamento: áreas de abrangência, índice AE2SFCA e desertos de saúde, zona urbana de Teresina.



Fonte: CNES/DataSUS; IBGE (2022); Overture Maps Foundation (2026). Elaboração própria.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com dados do CNES/DataSUS, IBGE e Overture Maps Foundation.

Tabela 8 – Síntese estatística do índice de acessibilidade AE2SFCA por modo (equipes de APS por 10 mil habitantes) e número de desertos de saúde, zona urbana de Teresina.

Modo	Setores com acesso (Qtd.)	Média	Mediana	Mín.	Máx.	Coefficiente de Variação (%)	Desertos (Qtd.)
Automóvel	1375	5,85	6,09	1,05	8,33	25,29	344
Pedestre	1357	5,62	5,79	0,0	145,63	81,57	358

Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com dados do CNES/DataSUS, IBGE e Overture Maps Foundation.

5.5 COMPARAÇÃO COM A ABORDAGEM TRADICIONAL (TESTE DE H_2)

O teste da hipótese metodológica confrontou o índice areal (AE2SFCA) ao tradicional por centroide (E2SFCA), sob idêntica parametrização, nos dois modos de deslocamento. No modo automóvel, a concordância de postos foi quase perfeita ($\rho = 0,991$; $p < 0,001$): a ordenação dos setores quanto à acessibilidade praticamente não se altera entre as formulações. A divergência restringe-se às margens da classificação - das duas abordagens resultam, respectivamente, 344 e 345 desertos de saúde, e apenas 23 setores (1,7%) mudam de condição, de forma aproximadamente simétrica (11 apenas sob o areal, 12 apenas sob o centroide). Por automóvel, portanto, a repartição areal não altera o diagnóstico, apenas o ajusta pontualmente.

No modo pedestre, ao contrário, a contribuição da abordagem areal é substancial. A concordância global, embora ainda alta, é menor ($\rho = 0,949$), e a discrepância na classificação de desertos amplia-se de forma expressiva: a abordagem por centroide identifica 408 desertos, contra 358 do areal (cinquenta a mais), e o número de setores reclassificados sobe para 78 (5,7%), mais que o triplo do observado no automóvel. Sobretudo, a reclassificação é fortemente assimétrica: dos 78 setores, 64 são marcados como deserto apenas pelo centroide, e não pela repartição areal.

A abordagem areal, assim, resgata 64 setores de uma condição de privação falsamente diagnosticada pelo método tradicional. Esse achado fornece comprovação empírica direta à crítica de Michels et al. (2024) aos métodos baseados na inclusão binária de pontos, como o 2SFCA e o E2SFCA. A explicação geométrica para essa divergência reside no fato de que as áreas de abrangência a pé são pequenas e, em setores periféricos de grande extensão, o centroide frequentemente recai fora da faixa alcançável, atribuindo acesso nulo. Ao abandonar a premissa irrealista de que toda a população de uma unidade geográfica está concentrada em seu centroide, a partição da demanda pela métrica de sobreposição areal soluciona os erros de mensuração característicos de áreas urbanas de menor densidade, comprovando a superioridade do modelo perante as distorções espaciais prévias

A Figura 33 espacializa essas divergências nos dois modos, e a Tabela 9 consolida as estatísticas do teste. O conjunto sustenta a H_2 de modo qualificado: a correção areal é marginal no automóvel (onde confirma a robustez do diagnóstico) e expressiva no modo pedestre, em que corrige um viés sistemático de

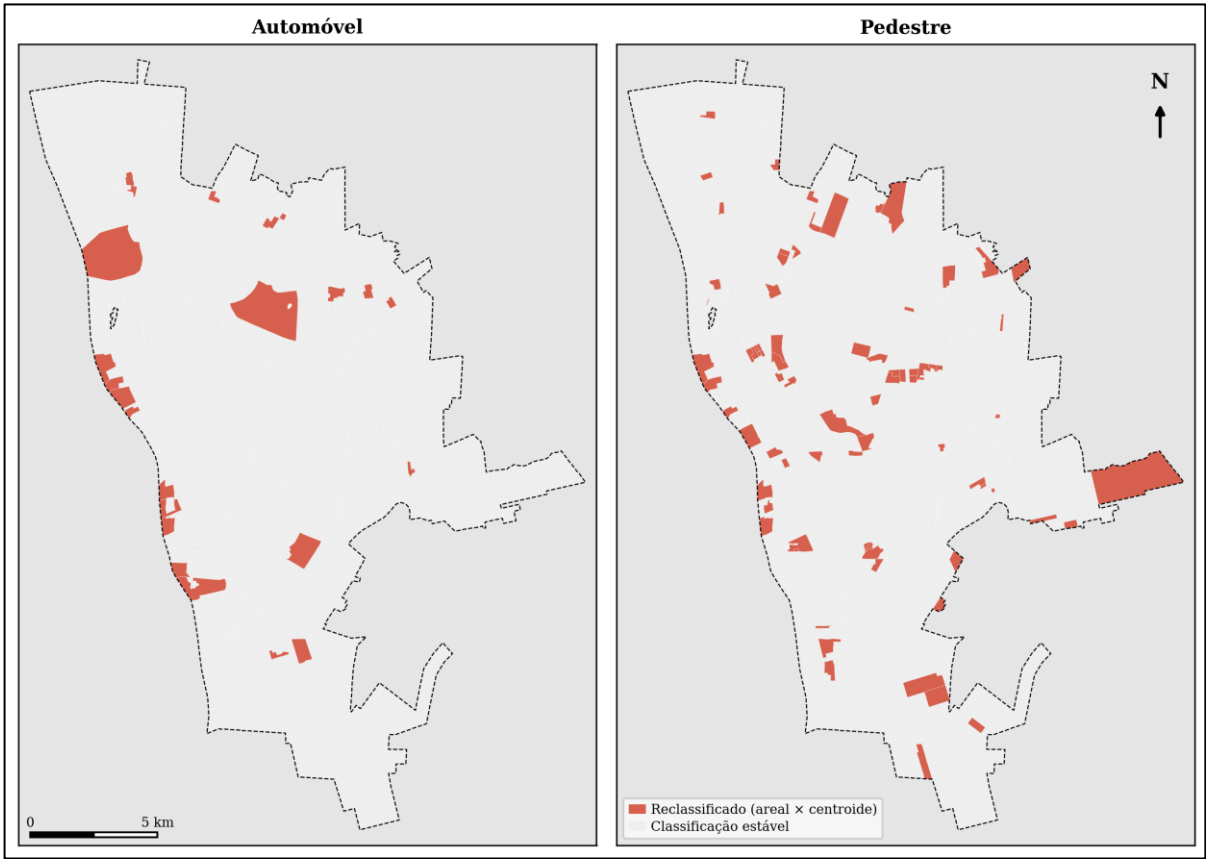
superdiagnóstico de desertos concentrado nos grandes setores periféricos. Demonstra-se, portanto, que o ganho metodológico da apropriação areal da demanda não é uniforme, mas se intensifica precisamente onde a premissa do centroide é mais frágil: nos deslocamentos de curto alcance e nas unidades territoriais extensas.

Tabela 9 - Síntese do teste H_2 (areal $\times$ centroide) por modo: correlação de *Spearman*, número de desertos de saúde em cada abordagem e setores reclassificados.

Modo	<i>spearman</i>	p-valor	Desertos (areal)	Desertos (centroide)	Reclassifi- cados	Reclassifica- dos (%)	Apenas Areal	Apenas Centroide
carro	0,991	0,0	344	345	23	1,7	11	12
pe	0,949	0,0	358	408	78	5,7	14	64

Fonte: CNES/DataSUS; IBGE (2022); Overture Maps Foundation (2026). Elaborado pelo autor (2026).

Figura 33 - Setores reclassificados quanto à condição de deserto de saúde entre as abordagens areal (AE2SFCA) e por centroide (E2SFCA), modo automóvel, zona urbana de Teresina.

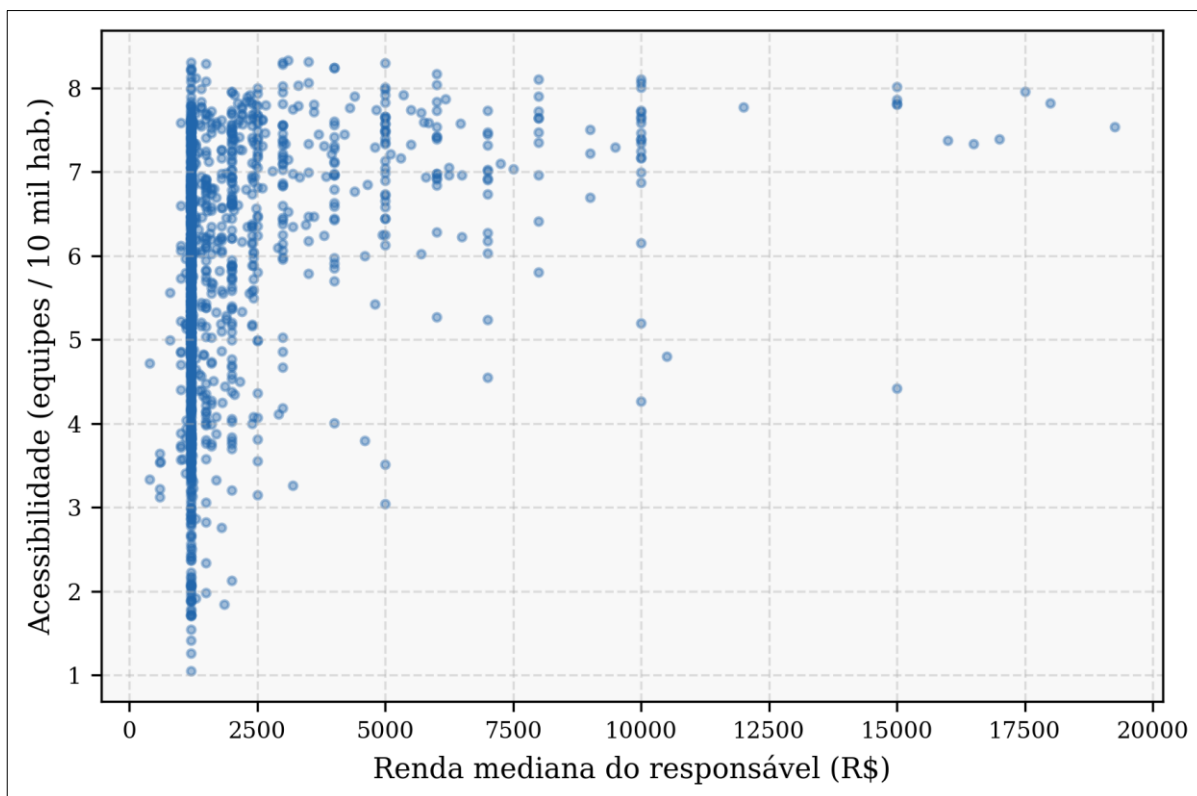


Fonte: CNES/DataSUS; IBGE; Overture Maps Foundation (2026). Elaborado pelo autor (2026).

5.6 DESIGUALDADE SOCIOESPACIAL (TESTE DE H_1)

No modo automóvel, a acessibilidade às UBS associou-se positiva e significativamente à renda mediana do responsável pelo domicílio ($\rho = 0,438$; $p < 0,001$), conforme ilustra o diagrama de dispersão da Figura 34. O sinal positivo é, em si, o achado central da iniquidade territorial: os setores de maior renda concentram a melhor acessibilidade, ao passo que os de menor renda acumulam as piores condições de acesso. A relação, contudo, não é estritamente linear (observa-se considerável dispersão), justificando o emprego de uma estatística de postos e da análise espacial para qualificar o padrão.

Figura 34 - Diagrama de dispersão entre o índice de acessibilidade no modo automóvel e a renda mediana do responsável por setor censitário, zona urbana de Teresina.

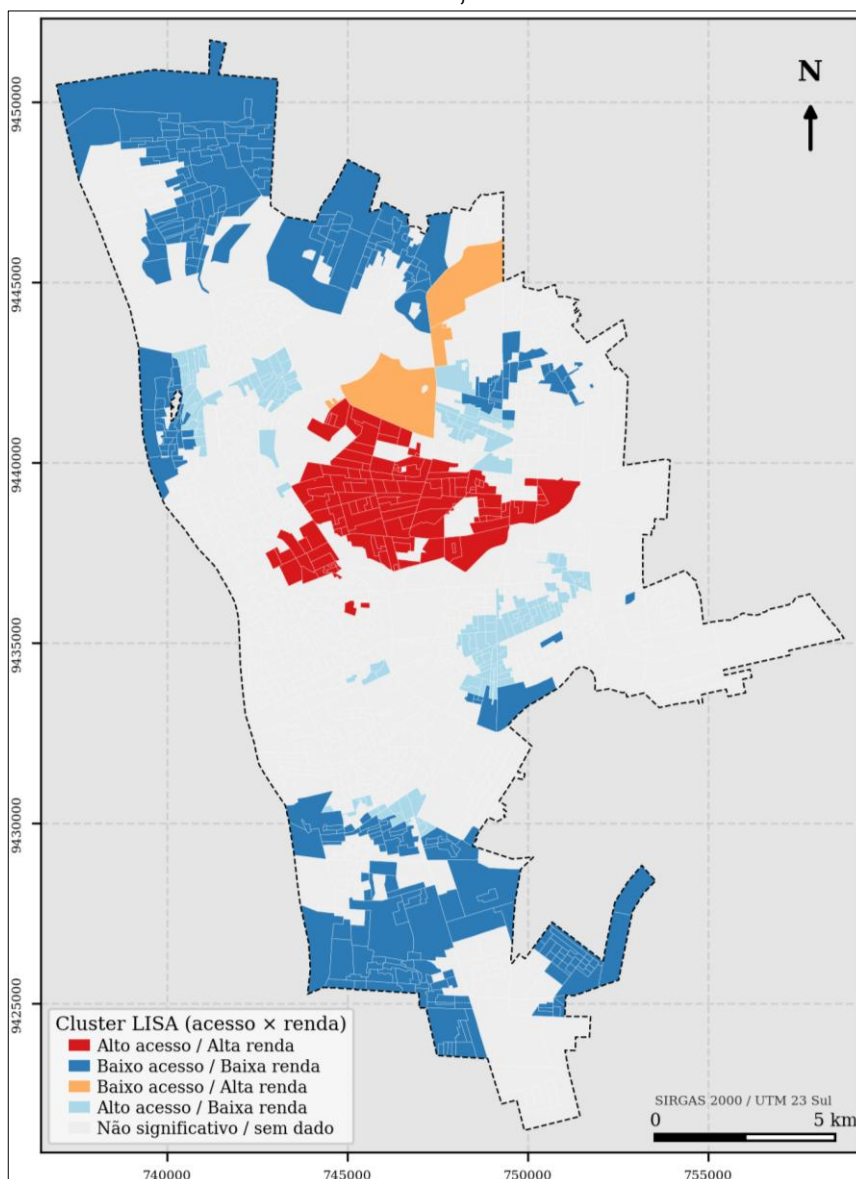


Fonte: IBGE (Censo 2022); CNES/DataSUS; Overture Maps Foundation (2026). Elaborado pelo autor (2026).

A acessibilidade no automóvel mostrou-se fortemente estruturada no espaço (I de Moran global de 0,933; $p = 0,001$), isto é, setores de acesso semelhante agrupam-se contiguamente, em vez de se distribuírem ao acaso. A autocorrelação espacial bivariada entre acessibilidade e renda foi igualmente positiva e significativa (I de Moran bivariado de +0,312; $p = 0,001$), indicando que o acesso de cada setor acompanha a renda de sua vizinhança. Os indicadores locais (LISA) detalham o fenômeno (Figura 35): predomina, com folga, o agrupamento baixo acesso–baixa

renda (307 setores), espacialmente concentrado na periferia, contra apenas 5 setores no agrupamento oposto de baixo acesso–alta renda. Esse padrão baixo-baixo confirma a H_1 no modo motorizado: a privação de acesso e a privação de renda coincidem territorialmente nas bordas da cidade.

Figura 35 - Agrupamentos locais bivariados (LISA) entre a acessibilidade no automóvel e a renda mediana, zona urbana de Teresina.



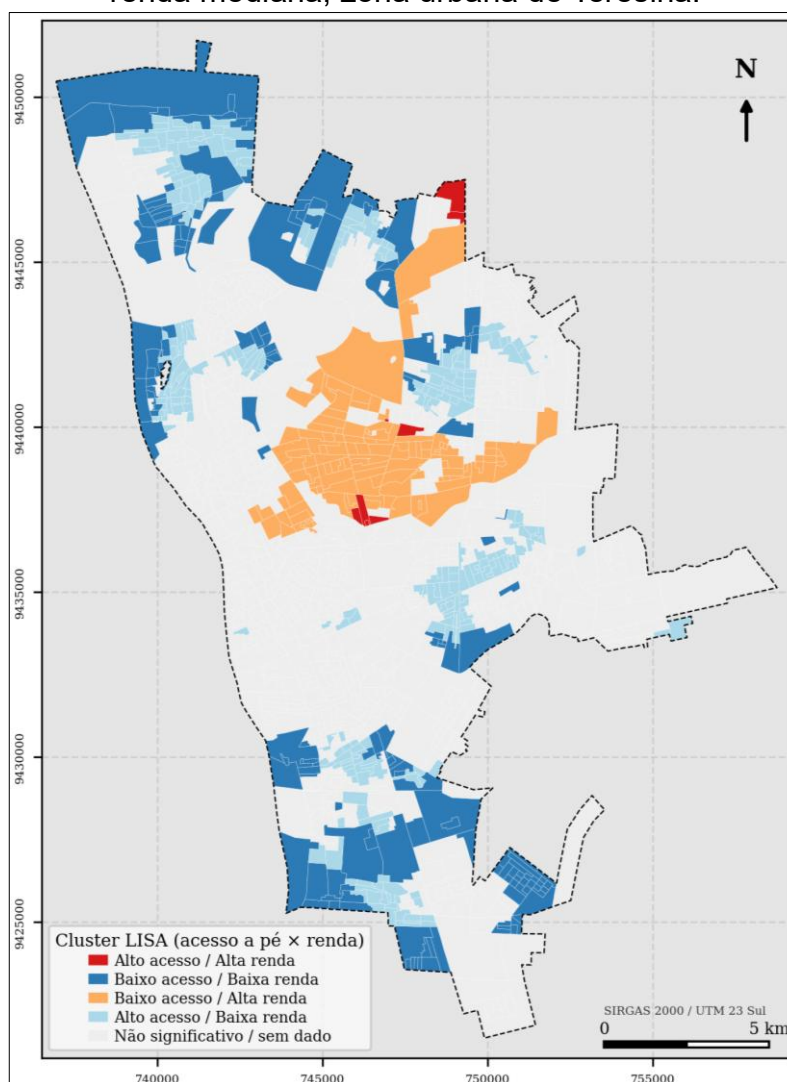
Fonte: IBGE (Censo 2022); CNES/DataSUS (2026); Overture Maps Foundation (2026). Elaborado pelo autor (2026).

O modo pedestre, todavia, inverte o diagnóstico. A correlação entre acessibilidade a pé e renda passou a ser negativa ($\rho = -0,199$; $p < 0,001$) e o I de Moran bivariado também inverteu o sinal ($I = -0,148$; $p = 0,001$). A análise de agrupamentos locais (LISA, Figura 36) revela o predomínio do agrupamento alto acesso–baixa renda (282 setores), demonstrando que os bairros adensados e de

menor renda, situados nas zonas central e intermediária, dispõem de boa acessibilidade a pé pela proximidade física das UBS. Além disso, a acessibilidade pedestre apresenta fraca estruturação espacial global (I de Moran = 0,190, contra 0,933 do automóvel), refletindo o seu caráter estritamente local. Persistem, contudo, 18 setores (1,3%) em situação de deserto absoluto a pé na periferia distante.

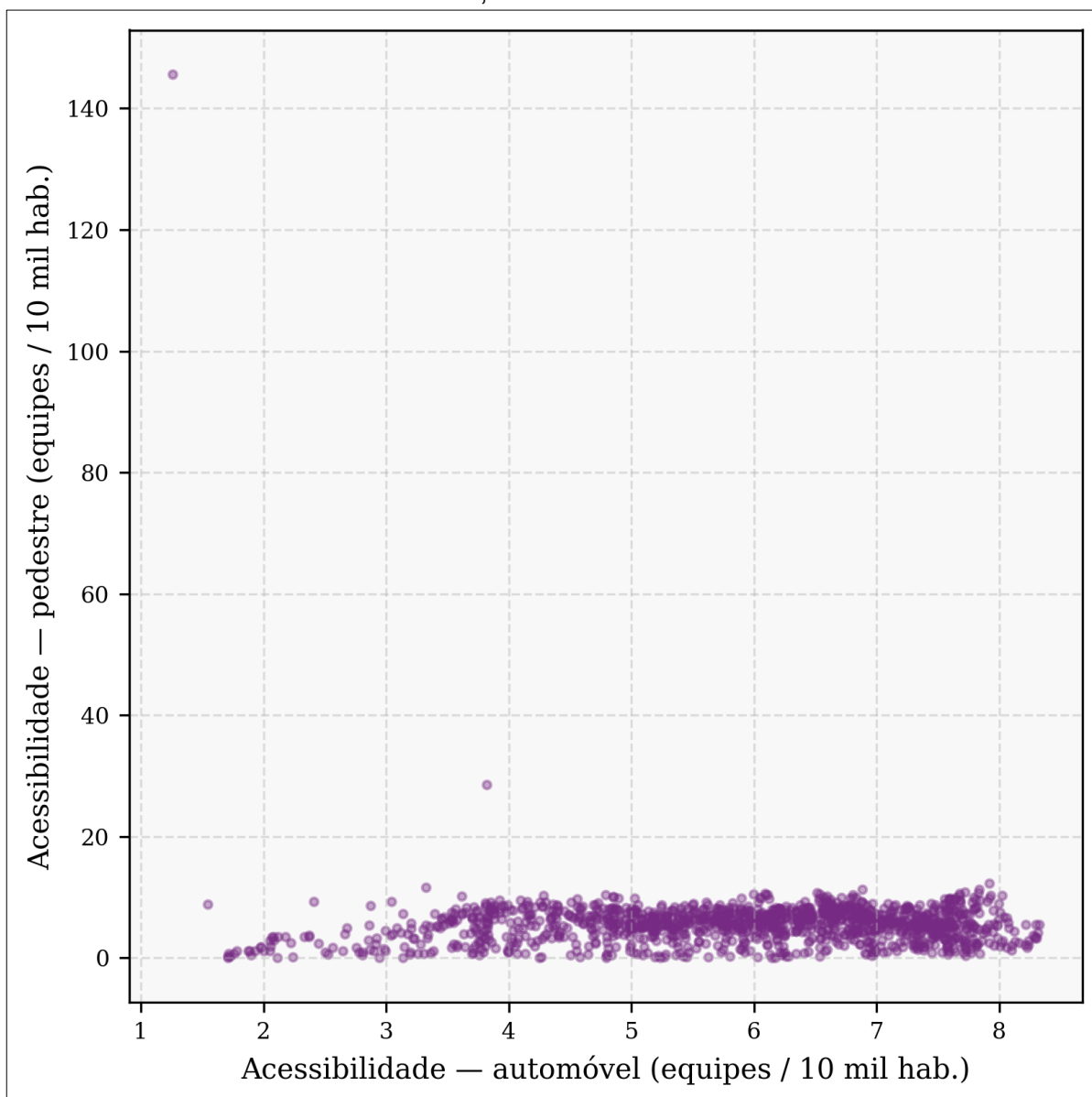
A contraposição entre os modais veicular e pedestre evidencia a natureza do fenômeno e a independência espacial das duas formas de deslocamento em Teresina (Figura 37). Ao cruzar os índices de acessibilidade motorizada e a pé setor a setor, observa-se a ausência de associação linear ou monótona entre as duas métricas, registrando um coeficiente de correlação de postos de *Spearman* de $\rho = 0,069$ ($p < 0,001$).

Figura 36 - Agrupamentos locais bivariados (LISA) entre a acessibilidade a pé e a renda mediana, zona urbana de Teresina.



Fonte: IBGE (Censo 2022); CNES/DataSUS; Overture Maps Foundation (2026). Elaborado pelo autor (2026).

Figura 37 - Relação entre os índices de acessibilidade no automóvel e a pé, por setor censitário, zona urbana de Teresina.



Fonte: CNES/DataSUS; IBGE; Overture Maps Foundation (2026). Elaborado pelo autor (2026).

Para atestar a estabilidade estatística dessa inferência e afastar o risco de distorções induzidas por valores extremos, executou-se um teste de verificação de robustez mediante a exclusão dos dois setores atípicos visíveis na extremidade superior da Figura 37. O recálculo da correlação de *Spearman* sem esses pontos resultou em $\rho = 0,073$ ($p < 0,001$), valor estatisticamente equivalente e virtualmente nulo. Essa convergência confirma que o desacoplamento entre a acessibilidade veicular e pedestre não é um artefato amostral, mas uma propriedade estrutural do território urbano de Teresina: ter elevada acessibilidade por automóvel não garante, de modo algum, boa acessibilidade a pé.

A leitura integrada desses achados confirma a hipótese socioterritorial (H_1), demonstrando que a iniquidade de acesso às UBS em Teresina não é absoluta, mas sim condicionada pela dependência modal do automóvel. Enquanto a infraestrutura viária favorece o deslocamento motorizado dos setores centrais e de maior renda, a população periférica de menor renda sofre com a dupla privação: enfrenta o isolamento na caminhada e a escassez de acessibilidade veicular.

Dialogando com os modelos conceituais de Levesque, Harris e Russell (2013) e com a Teoria do Acesso de Penchansky e Thomas (1981), evidencia-se que, em um sistema universal e gratuito como o SUS, a barreira de acesso desloca-se da dimensão direta para a Capacidade de Pagamento (*Affordability*) indireta de transporte, convertendo a dependência do veículo motorizado no principal vetor de exclusão geográfica da Atenção Primária.

6 CONCLUSÃO

A investigação cumpriu integralmente seus objetivos ao responder ao problema de pesquisa formulado, diagnosticando os níveis atuais de acessibilidade geográfica às Unidades Básicas de Saúde (UBS) na zona urbana de Teresina sob uma abordagem multimodal e areal. Os achados comprovam que a oferta física agregada do município, equivalente a 5,87 equipes para cada 10 mil habitantes, é quantitativamente suficiente, mas apresenta uma distribuição espacial profundamente desequilibrada e inequitativa.

Os resultados empíricos confirmam a primeira hipótese (H_1), de natureza socioterritorial, ao revelarem que a acessibilidade geográfica não é uniforme, mas dita criticamente pelo modo de transporte. No cenário motorizado veicular, a infraestrutura viária garante uma cobertura física de 98,5% da mancha urbana em até 30 minutos, associando-se positivamente à renda mediana ($\rho = +0,438, p < 0,001$) e favorecendo os setores de maior poder aquisitivo situados na região central. Em contrapartida, no deslocamento a pé, o alcance reduz-se para 69,5% da superfície urbana e a associação com a renda inverte-se ($\rho = -0,199, p < 0,001$), expondo a severa exclusão geográfica das populações periféricas de menor renda, que sofrem com a dependência forçada da caminhada em territórios desprovidos de oferta próxima.

A avaliação da modelagem confirma a segunda hipótese (H_2), de natureza metodológica, demonstrando que a aplicação do método AE2SFCA com representação areal da demanda qualifica o diagnóstico espacial ao corrigir erros sistemáticos da abordagem tradicional por centroides (E2SFCA). Embora os dois métodos apresentem concordância quase perfeita no modo automóvel ($\rho = 0,991$), a abordagem areal corrigiu o diagnóstico equivocado de 64 falsos desertos de saúde no modo pedestre (uma redução de 12,2% nos erros de superdiagnóstico). Demonstra-se, assim, que a representação areal é indispensável para evitar a alocação distorcida de recursos públicos, constituindo-se em um instrumento preciso, transparente e replicável para subsidiar a gestão territorial da saúde pública.

7 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Os resultados devem ser lidos à luz de algumas limitações, de dados e de método.

No plano dos dados, a base viária da Overture Maps apresentou lacunas de classificação funcional e de atributos de superfície, contornadas por imputação via Rede Neural em Grafos - ela própria uma estimativa sujeita a erro. Ademais, cerca de 2% da população reside em setores de borda não plenamente cobertos pelas camadas, e 35 setores não dispunham de dado socioeconômico utilizável (omitidos por sigilo estatístico), tendo sido excluídos das análises de renda. No teste de robustez dasimétrica, as pegadas de edificação carecem de atributos de uso e de número de pavimentos, de modo que não se distinguem estruturas residenciais nem se capta a verticalização.

No plano metodológico, a definição de "deserto de saúde" é operacional e relativa (quartil inferior do índice), não correspondendo a um limiar absoluto de suficiência clínica. Sua função é comparativa, não normativa.

O método de captação flutuante é sensível a denominadores de demanda muito pequenos nas bordas da rede percorrível, o que produziu, no modo pedestre, valores extremos isolados de índice (artefato neutralizado pelo uso de estatísticas robustas (mediana e percentis)).

A oferta foi quantificada pelo número de equipes ativas, sem ponderar a heterogeneidade da demanda (estrutura etária, perfil de morbidade) nem a qualidade ou os tempos de espera do atendimento.

Os tempos de deslocamento foram modelados a partir de velocidades de projeto e de um fator de atrito urbano, sem considerar congestionamentos, variações horárias ou a oferta de transporte coletivo, e cada viagem pressupôs um único modo.

Os tempos de deslocamento foram calculados sobre uma rede não-direcionada, sem incorporar o sentido de circulação das vias (mão única). Para o modo pedestre isso é irrelevante. Para o automóvel, constitui uma simplificação que pode superestimar discretamente o alcance em áreas com sistema viário de sentido único: atributo (*oneway*) disponível na malha viária do Overture Maps e passível de incorporação em trabalhos futuros.

Por fim, a análise é de recorte transversal (uma competência do CNES) e circunscrita à zona urbana, não capturando dinâmicas temporais nem o território rural.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A contribuição desta pesquisa é, como antecipado, dupla. No plano social, produziu-se a primeira auditoria espacialmente explícita da efetividade do acesso à Atenção Primária em Teresina baseada em redes viárias reais, capaz de localizar com precisão as iniquidades territoriais e de evidenciar seu condicionamento pela dependência do automóvel: achado com implicações diretas para a articulação entre as políticas de saúde e de mobilidade urbana.

No âmbito tecnológico, a reprodutibilidade integral da rotina para outros municípios brasileiros é limitada pela dependência de dados abertos governamentais estruturados. A necessidade de extração manual das coordenadas das UBS em portais municipais, decorrente da ausência de APIs públicas padronizadas de saúde nas prefeituras, constitui uma barreira operacional que impede a automatização completa do roteiro computacional.

Para o gestor público, os produtos cartográficos e o índice oferecem subsídio objetivo à localização de novas unidades, ao redimensionamento de equipes e à priorização de investimentos nos territórios de pior acesso.

Para a pesquisa, abrem-se diversos desdobramentos: a ponderação da demanda pela estrutura etária e pelo perfil epidemiológico da população; a incorporação do transporte coletivo como modo adicional de deslocamento; a introdução de dinâmicas temporais (variação horária do tráfego); o refinamento da oferta para além da contagem de equipes, incluindo capacidade instalada e indicadores de qualidade; e a validação dos "desertos de saúde" identificados com dados de utilização efetiva dos serviços.

Como perspectiva de pesquisas futuras e evolução do repositório computacional desenvolvido, destaca-se a consolidação do módulo de robustez dasimétrica. Os ensaios preliminares estruturados com o uso de edificações residenciais urbanas sugerem uma convergência estatística da modelagem areal frente ao Problema da Unidade de Área Modificável (MAUP). Esse comportamento autoriza o uso seguro dos dados censitários convencionais pelo gestor público, pavimentando o caminho para que futuras atualizações do pacote computacional incorporem a estimativa de verticalização e uso do solo predial.

A extensão da rotina a outras capitais permitiria, ademais, estudos comparativos e a consolidação de um instrumento nacional de mensuração da equidade geográfica em saúde.

Conclui-se que a pesquisa atingiu seus objetivos e confirmou suas hipóteses, oferecendo, mais do que um retrato da acessibilidade às UBS de Teresina, um método transparente e replicável para que esse retrato seja continuamente revisto, maximizando, assim, o retorno social do investimento público realizado neste mestrado.

9 REFERÊNCIAS

- ALBORZ, Alison; MCNALLY, Rosalind; GLENDINNING, Caroline. **Access to healthcare for people with learning disabilities: Mapping the issues and reviewing the evidence**. Journal of health services research & policy, [s. l.], v. 10, n. 3, p. 173–182, 2005. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2020839/>. Acesso em: 14 jun. 2025.
- BARRÍOS, Johnatan Estik; MONCADA, Carlos Alberto; ESCOBAR, Diego Alexander. **Geographic accessibility analysis using the e2sfca model in hospitals located in armenia, quindío**. Geojournal of Tourism and Geosites, [s. l.], v. 47, n. 2, p. 648–655, 2023. Disponível em: <https://gtg.webhost.uoradea.ro/PDF/GTG-2-2023/gtg.47233-1065.pdf>. Acesso em: 5 dez. 2023.

BRASIL. **Aprova a Política Nacional de Atenção Básica, estabelecendo a revisão de diretrizes para a organização da Atenção Básica, no âmbito do Sistema Único de Saúde (SUS)**. Portaria nº 2.436, de 21 de setembro de 2017. 2017. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2017/prt2436_22_09_2017.html. Acesso em: 22 fev. 2025.

BRASIL. **Sistema Único de Saúde - SUS**. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/saude/pt-br/sus/sus>. Acesso em: 20 set. 2024.

BRÎNZAC, Monica G *et al.* **Defining medical deserts – an international consensus-building exercise**. The European Journal of Public Health, [s. l.], v. 33, n. 5, p. 785–788, 2023. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10567127/>. Acesso em: 11 mar. 2026.

BRYANT JR, James; DELAMATER, Paul L. **Examination of spatial accessibility at micro- and macro-levels using the enhanced two-step floating catchment area (E2SFCA) method**. Annals of GIS, [s. l.], v. 25, n. 3, p. 219–229, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/19475683.2019.1641553>. Acesso em: 5 out. 2025.

BUSSAB, Wilton de O.; MORETTIN, Pedro A. **Estatística Básica**. 10. ed. São Paulo: SaraivaUni, 2023.

CAMPANELLI, Bruno *et al.* **Car Dependency in Urban Accessibility**. [S. l.]: arXiv, 2026. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2604.01019>. Acesso em: 27 abr. 2026.

CUCINOTTA, Domenico; VANELLI, Maurizio. **WHO Declares COVID-19 a Pandemic**. Acta Bio Medica : Atenei Parmensis, [s. l.], v. 91, n. 1, p. 157–160, 2020. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7569573/>. Acesso em: 29 ago. 2024.

FERREIRA, Ricardo Vicente; RAFFO, Jorge Da Graça. **O uso dos sistemas de informação geográfica (sig) no estudo da acessibilidade física aos serviços de saúde pela população rural: revisão da literatura**. Hygeia - Revista Brasileira de Geografia Médica e da Saúde, [s. l.], v. 8, n. 15, p. 177–189, 2012. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/hygeia/article/view/17743>. Acesso em: 1 abr. 2024.

FONSECA, Bruna de Paula *et al.* **Geographic accessibility to cancer treatment in Brazil: A network analysis**. The Lancet Regional Health - Americas, [s. l.], v. 7, p. 100153, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667193X21001496>. Acesso em: 23 ago. 2024.

GIOVANELLA, Lígia *et al.* **De Alma-Ata a Astana. Atenção primária à saúde e sistemas universais de saúde: compromisso indissociável e direito humano fundamental**. Cadernos de Saúde Pública, [s. l.], v. 35, n. 3, p. e00012219, 2019. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-311X2019000300301&tlng=pt. Acesso em: 24 ago. 2024.

GUAGLIARDO, Mark F. Spatial accessibility of primary care: concepts, methods and challenges. International Journal of Health Geographics, [s. l.], 2004.

GULLIFORD, Martin *et al.* **What does “access to health care” mean?** *Journal of Health Services Research & Policy*, [s. l.], v. 7, n. 3, p. 186–188, 2002. Disponível em: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1258/135581902760082517>. Acesso em: 11 mar. 2024.

HACAR, Müslüm; ALTAFINI, Diego; CUTINI, Valerio. **Network-Based Hierarchical Feature Augmentation for Predicting Road Classes in OpenStreetMap**. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, [s. l.], v. 13, n. 12, p. 456, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2220-9964/13/12/456>. Acesso em: 14 jun. 2026.

HAMILTON, William L.; YING, Rex; LESKOVEC, Jure. **Inductive representation learning on large graphs**. [S. l.]: arXiv, 2018. Disponível em: <http://arxiv.org/abs/1706.02216>. Acesso em: 14 jun. 2026.

HIGGS, Gary. **A literature review of the use of GIS-based measures of access to health care services**. *Health Services and Outcomes Research Methodology*, [s. l.], v. 5, n. 2, p. 119–139, 2004. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s10742-005-4304-7>. Acesso em: 19 nov. 2023.

HIGGS, Gary; LANGFORD, Mitch; FRY, Richard. **The use of GIS-derived accessibility measures in mixed methods research: A research agenda**. United Kingdom, 2010. p. 36. Disponível em: https://wiserd.ac.uk/wp-content/uploads/WISERD_WPS_001.pdf. Acesso em: 15 jun. 2025.

IBGE. **Cidades**. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/panorama-impresso?cod=2211001>. Acesso em: 19 jun. 2025.

IPEA. **ODS 3: o que mostra o retrato do Brasil?** Caderno ODS. Brasil: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2019. Disponível em: https://www.ipea.gov.br/ods/ods3_card. .

KRÜGEL, Falko; MÄS, Stephan. **A web-application for measuring spatial accessibility in health planning**. *AGILE: GIScience Series*, [s. l.], v. 4, p. 1–11, 2023. Disponível em: <https://agile-giss.copernicus.org/articles/4/6/2023/>. Acesso em: 29 nov. 2023.

LEVESQUE, Jean-Frederic; HARRIS, Mark F; RUSSELL, Grant. **Patient-centred access to health care: conceptualising access at the interface of health systems and populations**. *International Journal for Equity in Health*, [s. l.], v. 12, p. 18, 2013. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3610159/>. Acesso em: 15 jun. 2025.

LUO, Jun. **Integrating the Huff Model and Floating Catchment Area Methods to Analyze Spatial Access to Healthcare Services**. *Transactions in GIS*, [s. l.], v. 18, n. 3, p. 436–448, 2014. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/tgis.12096>. Acesso em: 15 jun. 2025.

LUO, Jing *et al.* **Use of an E2SFCA method to measure and analyse spatial accessibility to medical services for elderly people in wuhan, china**. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, [s. l.], v. 15, n. 7, p. 1503, 2018. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1660-4601/15/7/1503>. Acesso em: 25 nov. 2023.

LUO, Wei; QI, Yi. **An enhanced two-step floating catchment area (E2SFCA) method for measuring spatial accessibility to primary care physicians**. *Health & Place*, [s. l.], v. 15, n. 4, p. 1100–1107, 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1353829209000574>. Acesso em: 23 ago. 2024.

LUO, Wei; WANG, Fahui. **Measures of Spatial Accessibility to Health Care in a GIS Environment: Synthesis and a Case Study in the Chicago Region**. *Environment and Planning B: Planning and Design*, [s. l.], v. 30, n. 6, p. 865–884, 2003. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1068/b29120>. Acesso em: 13 mar. 2026.

MACHARIA, Peter M.; BANKE-THOMAS, Aduragbemi; BEŇOVÁ, Lenka. **Advancing the frontiers of geographic accessibility to healthcare services**. *Communications Medicine*, [s. l.], v. 3, n. 1, p. 1–4, 2023. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s43856-023-00391-w>. Acesso em: 19 nov. 2023.

MCGRAIL, Matthew R.; HUMPHREYS, John S. **Measuring spatial accessibility to primary care in rural areas: Improving the effectiveness of the two-step floating catchment area method**. *Applied Geography*, [s. l.], v. 29, n. 4, p. 533–541, 2009. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0143622809000034>. Acesso em: 17 ago. 2024.

MCLAUGHLIN, Catherine G; WYSZEWIANSKI, Leon. **Access to Care: Remembering Old Lessons**. *Health Services Research*, [s. l.], v. 37, n. 6, p. 1441–1443, 2002. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1475-6773.12171>. Acesso em: 13 jun. 2025.

MICHELS, Alexander *et al.* **An Areal Approach to Spatial Accessibility Analysis**. *Geographical Analysis*, [s. l.], v. n/a, n. n/a, 2024. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/gean.12415>. Acesso em: 25 out. 2024.

OVERTURE MAPS FOUNDATION. **Introduction | overture maps documentation**. , 2025. Disponível em: <https://docs.overturemaps.org/>. Acesso em: 25 fev. 2025.

PENCHANSKY, Roy; THOMAS, J William. **The Concept of Access: Definition and Relationship to Consumer Satisfaction**. *Medical Care*, [s. l.], v. 19, n. 2, p. 127–140, 1981. Disponível em: <http://journals.lww.com/00005650-198102000-00001>. Acesso em: 27 abr. 2024.

PEREIRA, Rafael H. M.; HERSZENHUT, Daniel. **Introdução à acessibilidade urbana: um guia prático em R**. Rio de Janeiro: IPEA, 2023. Disponível em: https://ipeagit.github.io/intro_access_book/.

RADKE, John; MU, Lan. **Spatial Decompositions, Modeling and Mapping Service Regions to Predict Access to Social Programs**. *Geographic Information Sciences*, [s. l.], v. 6, n. 2, p. 105–112, 2000. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10824000009480538>. Acesso em: 13 mar. 2026.

SATARZADEH, Laleh *et al.* **Understanding patient perceptions of access to healthcare centers in one of the major cities of Afghanistan**. *Scientific Reports*,

[s. l.], v. 15, p. 13500, 2025. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC12008384/>. Acesso em: 13 jun. 2025.

SATO, Yuta. **City2Graph: a python library for heterogeneous graph neural networks and spatial analysis in urban systems**. versão v0.3.1. [S. l.]: Zenodo, 2026. Disponível em: <https://zenodo.org/doi/10.5281/zenodo.19154778>. Acesso em: 6 jun. 2026.

SAURMAN, Emily. **Improving access: modifying Penchansky and Thomas's Theory of Access**. Journal of Health Services Research & Policy, [s. l.], v. 21, n. 1, p. 36–39, 2016. Disponível em: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1355819615600001>. Acesso em: 29 abr. 2024.

SHRESTHA, Jeny. **Evaluation of Access to Primary Healthcare**. 2010. 99 f. Mestrado - ITC, Holanda, 2010.

TESSEMA, Zemenu Tadesse *et al.* **Determinants of accessing healthcare in Sub-Saharan Africa: a mixed-effect analysis of recent Demographic and Health Surveys from 36 countries**. BMJ Open, [s. l.], v. 12, n. 1, p. e054397, 2022. Disponível em: <https://bmjopen.bmj.com/lookup/doi/10.1136/bmjopen-2021-054397>. Acesso em: 14 jun. 2025.

WHO. **Declaration of Astana**. [S. l.]: [s. d.], 2018. Disponível em: <https://www.who.int/docs/default-source/primary-health/declaration/gcphc-declaration.pdf>. Acesso em: 21 ago. 2024.

WHO. **SDG Target 3.8**. [S. l.], 2015. Disponível em: <https://www.who.int/data/gho/data/themes/theme-details/GHO/universal-health-coverage>. Acesso em: 21 ago. 2024.

WOOD, Sarah M. *et al.* **The application of spatial measures to analyse health service accessibility in Australia: a systematic review and recommendations for future practice**. BMC Health Services Research, [s. l.], v. 23, n. 1, p. 1–19, 2023. Disponível em: <https://bmchealthservres-biomedcentral-com.ez117.periodicos.capes.gov.br/articles/10.1186/s12913-023-09342-6>. Acesso em: 15 jun. 2025.

APÊNDICE A: 01.1 (LIMITES IBGE + CENSO)

1. **Objetivo:** Constitui a etapa inaugural do pipeline: delimita a área de estudo e provê a camada de demanda. Deriva a zona urbana a partir dos setores censitários contíguos de situação urbana, estrutura a zona de amortecimento de 5 km e funde os microdados socioeconômicos do Censo Demográfico de 2022 à malha setorial, produzindo o GeoDataFrame mestre da pesquisa.
2. **Bibliotecas.** geopandas (manipulação vetorial, dissolução e recorte); shapely.ops.unary_union (união geométrica e extração do componente contíguo); pandas/numpy (ETL tabular e tratamento de valores); requests/zipfile/io (aquisição HTTP dos agregados IBGE); mapeprof (constantes de CRS e caminhos).
3. **I/O:**
 - a. **Inputs:** malhas territoriais do IBGE (município, bairros, setores CD2022, grade estatística, CNEFE), obtidas por requisição HTTP a geoftp.ibge.gov.br/ftp.ibge.gov.br; agregados por setor de Demografia (V01006) e Rendimento do Responsável (V06004, V06006).
 - b. **Outputs (GeoParquet, EPSG:31983):** teresina_municipio.parquet, teresina_bairros.parquet, teresina_zonaUrbana_utm.parquet, teresina_zonaUrbana_buffer5kClip_utm.parquet, teresina_setoresCensitariosUrbanos.parquet, teresina_gradeEstatistica_utm.parquet e, em intermediarios/01_malha/, teresina_setoresCensitarios_DadosCompleto.parquet (mestre).
4. **Função core:** ETL do censo com tratamento do sigilo estatístico (distinção entre zero real e valor omitido):

```
def extrair_e_limpar_censo(url, mapa_vars):
    resposta = requests.get(url)
    if resposta.status_code != 200:
        raise ValueError(f"❌ IBGE retornou HTTP {resposta.status_code}\nLink: {url}")
    with zipfile.ZipFile(io.BytesIO(resposta.content)) as z:
        nome_csv = next(n for n in z.namelist() if n.endswith(".csv"))
        with z.open(nome_csv) as f:
            cabecalho = pd.read_csv(f, sep=";", nrows=0).columns
            real = {c.upper(): c for c in cabecalho}
            col_chave = real["CD_SETOR"]
            cols = [col_chave] + [real[v] for v in mapa_vars]
            f.seek(0)
            df = pd.read_csv(f, sep=";", usecols=cols, dtype=str)
        df = df.rename(columns={col_chave: "CD_SETOR",
                                **{real[v]: nome for v, nome in mapa_vars.items()}})
    for nome in mapa_vars.values():
        df[nome] = pd.to_numeric(df[nome].replace({"-": 0, "X": np.nan}), errors="coerce")
    return df
```

5. **Parâmetros críticos:** CRS métrico EPSG:31983 (SIRGAS 2000 / UTM 23S); CRS geográfico EPSG:4674; buffer de 5.000 m (cap_style='flat'); variáveis retidas V01006→populacao, V06006→renda_mediana, V06004→renda_media; marcadores de sigilo '-'→0, 'X'→NaN; delimitação por maior componente conectado (exclusão dos núcleos disjuntos em NM_NU).
6. **Reprodutibilidade:** https://github.com/felipedantas-pi/ae2sfca-ubs/blob/main/notebooks/01.1_Aquisicao_Limites_IBGE.ipynb

APÊNDICE B: 01.2 (OVERTURE)

1. **Objetivo:** Adquire a infraestrutura física da análise. Extrai da Overture Maps Foundation a malha viária (temas segment e connector) e as pegadas de construção (building) recortadas à área de estudo, fixando a versão dos dados para assegurar reprodutibilidade.
2. **Bibliotecas.** city2graph (interface de extração da Overture por polígono); overturemaps (extração das edificações por bounding box); geopandas (reprojeção e persistência); mapeprof.
3. **I/O:**
 - a. **Inputs:** teresina_zonaUrbana_utm.parquet, teresina_zonaUrbana_buffer5kClip_utm.parquet (NB 01.1); API pública Overture (release fixado).
 - b. **Outputs:** zonaUrbana_5km_segmentos.{geojson,parquet}, zonaUrbana_5km_conectores.{geojson,parquet} e zonaUrbana_building_utm.geojson — GeoJSON preserva os atributos aninhados (JSON) da Overture; Parquet destina-se à leitura rápida.
4. **Função core:** Extração da malha com versão fixada e dupla persistência:

```
dados_viarios = c2g.load_overture_data(
    area=gdf_zonaUrbana_buffer5km_wgs,      # área de estudo (ZU + buffer 5 km)
    types=subdatasets,
    output_dir=EXT_OVERTURE,
    prefix='zonaUrbana_5km_',
    save_to_file=False,
    return_data=True,
    release=RELEASE_OVERTURE,
    use_stac=False,
)

segments_metric = dados_viarios['segment'].to_crs(CRS_METRICO)
connectors_metric = dados_viarios['connector'].to_crs(CRS_METRICO)
```

5. **Parâmetros críticos:** RELEASE_OVERTURE = '2026-06-17.0'; subdatasets = ["segment","connector"]; CRS de requisição EPSG:4326 (exigência da API), persistência em EPSG:31983.
6. **Reprodutibilidade:** https://github.com/felipedantas-pi/ae2sfca-ubs/blob/main/notebooks/01.2_Aquisicao_Malha_Overture.ipynb

APÊNDICE C: 01.3 (UBS/OFERTA)

1. **Objetivo:** Constitui a camada de oferta (S_j) do modelo. Adquire a localização das UBS (etapa manual, do geoportal municipal) e quantifica automaticamente a capacidade instalada — número de equipes de Atenção Primária ativas — a partir da Base de Dados CNES, aplicando o recorte espacial da área de estudo.
2. **Bibliotecas.** geopandas (junção espacial e recorte); pandas/numpy (agregação da capacidade); shapely (operações de contenção); matplotlib (cartografia da oferta); urllib/zipfile (download CNES); mapeprof.
3. **I/O:**
 - a. **Inputs:** ubs.geojson (93 UBS) e area_das_esf.geojson (240 áreas), do SEMPLAM; BASE_DE_DADOS_CNES_202604.ZIP (DataSUS, tabela tbEquipe); teresina_setoresCensitarios_DadosCompletos.parquet e limites (NB 01.1).
 - b. **Outputs:** teresina_zonaUrbana_buffer5km_ubs_capacidade.parquet (81 UBS, oferta S_j), teresina_ubs_capacidade.parquet (93, referência); tabelas nb013_sintese_oferta.csv, nb013_oferta_por_regional.csv.
4. **Função core:** Cômputo de S_j e filtro espacial da oferta:

```

ativas = equipes[(equipes["CO_MUNICIPIO"] == COD_MUNICIPIO_TERESINA)
                  & (equipes["DT_DESATIVACAO"].isna())
                  & (equipes["TP_EQUIPE"].isin(TIPOS_EQUIPE_APS))].copy()
ativas["cnes"] = ativas["CO_UNIDADE"].str[-7:]
capacidade = ativas.groupby("cnes").size().rename("capacidade_equipos")
ubs["capacidade_equipos"] = ubs["cnes"].astype(str).map(capacidade).fillna(0).astype(int)
# recorte: zona urbana + buffer de 5 km (mantém UBS de borda; evita efeito de borda)
na_area_estudo = ubs.geometry.within(area_estudo)
ubs = ubs[na_area_estudo].copy()

```

5. **Parâmetros críticos:** COMPETENCIA_CNES = "202604";
 COD_MUNICIPIO_TERESINA = "221100"; TIPOS_EQUIPE_APS =
 {"70", "71"} (eAP, eSF); critério de inclusão espacial within(zona urbana +
 buffer 5 km).
6. **Reprodutibilidade:** https://github.com/felipedantas-pi/ae2sfca-ubs/blob/main/notebooks/01.3_Aquisicao_UBS.ipynb

APÊNDICE D: 02.1 (LIMPEZA/TOPOLOGIA)

1. **Objetivo:** Transforma os segmentos brutos da Overture no grafo viário analítico. Executa filtro semântico (retenção do subtipo rodoviário), correção topológica (materialização dos cruzamentos como nós) e engenharia de atributos aninhados, caracterizando estatística e cartograficamente a malha.
2. **Bibliotecas.** city2graph (correção topológica e geração do grafo); networkx (conectividade e valência das interseções); geopandas/pandas (filtros e atributos); matplotlib; mapeprof.overture/mapeprof.geom (parsers de superfície/velocidade e linearidade).
3. **I/O.**
 - a. **Inputs:** zonaUrbana_5km_segmentos.geojson, zonaUrbana_5km_conectores.geojson (NB 01.2); limites (NB 01.1).
 - b. **Outputs:** zonaUrbana_5km_road_cleaned.parquet (grafo limpo, INT_GRAFO); oito tabelas nb021_*.csv (completude, subtipos, superfície, velocidade, classes, valência, síntese).
4. **Função core:** Correção topológica via city2graph (etapa crítica para a validade das isócronas):

```
arestas_gdf = c2g.process_overture_segments(
    segments_gdf=road_gdf,
    connectors_gdf=connectors_gdf,
    get_barriers=False, # barreiras só são usadas pelo morphological_graph()
    threshold=3.0,      # tolerância de snap, em METROS (exige CRS métrico)
)
# conectividade: grafo auxiliar (nós = extremidades coincidentes após o snapping)
G = nx.Graph()
for geom in arestas_gdf.geometry:
    G.add_edge(geom.coords[0], geom.coords[-1])
componentes = sorted(nx.connected_components(G), key=len, reverse=True)
pct_gigante = len(componentes[0]) / G.number_of_nodes() * 100
```

5. **Parâmetros críticos:** Filtro subtype == 'road' (exclusão de ferrovias); betweenness_centrality com amostragem k≈400 (aproximação); percentil p99 do comprimento para tratamento de arestas anômalas.
6. **Reprodutibilidade:** [https://github.com/felipedantas-pi/ae2sfca-ubs/blob/main/notebooks/02.1 Limpeza e Topologia.ipynb](https://github.com/felipedantas-pi/ae2sfca-ubs/blob/main/notebooks/02.1%20Limpeza%20e%20Topologia.ipynb)

APÊNDICE E: 02.2 (GNN)

1. **Objetivo:** Preenche as lacunas de classificação funcional das vias (unknown/unclassified) que impediriam a atribuição de velocidade. Emprega Rede Neural em Grafos (GraphSAGE) sobre o grafo dual, com Random Forest como linha de base metodológica, seguida de refinamento de continuidade funcional.
2. **Bibliotecas.** torch/torch_geometric (GraphSAGE, objeto Data); sklearn (Random Forest, StratifiedKFold, F1-score, class_weight); networkx (grafo dual e centralidade); geopandas/pandas/numpy.
3. **I/O.**
 - a. **Inputs:** zonaUrbana_5km_road_cleaned.parquet (NB 02.1)
 - b. **Outputs:** zonaUrbana_5km_road_imputed.parquet (malha 100% classificada); nb022_correcoes_continuidade.csv.
4. **Função core:** Rede GraphSAGE:

```
class RoadSAGE(torch.nn.Module):
    """GraphSAGE de 2 camadas para classificação de nós (vias)."""
    def __init__(self, n_features, n_hidden, n_classes):
        super().__init__()
        self.conv1 = SAGEConv(n_features, n_hidden)
        self.conv2 = SAGEConv(n_hidden, n_classes)
    def forward(self, x, edge_index):
        x = F.relu(self.conv1(x, edge_index))
        x = F.dropout(x, p=0.3, training=self.training)
        return self.conv2(x, edge_index)

def treinar_gnn(ponderar, epocas=300):
    torch.manual_seed(42)
    modelo = RoadSAGE(len(FEATURES), 32, len(encoder.classes_))
    otim = torch.optim.Adam(modelo.parameters(), lr=0.01, weight_decay=5e-4)
    pesos = torch.tensor(compute_class_weight("balanced",
        classes=np.arange(len(encoder.classes_)), y=y[idx_treino]),
        dtype=torch.float) if ponderar else None
    for _ in range(epocas):
        modelo.train(); otim.zero_grad()
        saida = modelo(data.x, data.edge_index)
        F.cross_entropy(saida[mask_treino], data.y[mask_treino], weight=pesos).backward()
        otim.step()
    ...
```

5. **Parâmetros críticos:** Validação StratifiedKFold(5); features dominantes comprimento (0,40) e betweenness (0,31); ponderação de classes rejeitada metodologicamente (distorcia a composição prevista); grafo dual não-direcionado.

6. **Reprodutibilidade:** [https://github.com/felipedantas-pi/ae2sfca-ubs/blob/main/notebooks/02.2 Imputacao GNN City2Graph.ipynb](https://github.com/felipedantas-pi/ae2sfca-ubs/blob/main/notebooks/02.2%20Imputacao%20GNN%20City2Graph.ipynb)

APÊNDICE F: 03.1 (IMPEDÂNCIAS)

1. **Objetivo:** Converte a malha classificada em grafo ponderado por tempo de viagem, para os modos automóvel e pedestre. Atribui a cada aresta um custo de travessia (impedância, em minutos) calibrado por velocidades teóricas de projeto e fator de atrito urbano.
2. **Bibliotecas.** geopandas/pandas/numpy (mapeamento classe→velocidade e cálculo vetorial); matplotlib (calibração e distribuições); mapeprof.
3. **I/O.**
 - a. **Inputs:** zonaUrbana_5km_road_imputed.parquet (NB 02.2).
 - b. **Outputs:** zonaUrbana_5km_road_routed.parquet (colunas tempo_carro_min, tempo_pe_min); nb031_calibracao_velocidades.csv.
4. **Função core:** Impedância por modo, com proibições de tráfego expressas por tempo infinito:

```
FATOR_FRICCAO = 0.70
VELOCIDADE_PEDESTRE_KMH = 4.8
CARRO_PROIBIDO = {"pedestrian", "footway", "path", "steps", "cycleway"}
PE_PROIBIDO     = {"motorway", "trunk"}

gdf["vel_carro"] = gdf["vel_teorica"] * FATOR_FRICCAO
dist_km = gdf["length_m"] / 1000.0
gdf["tempo_carro_min"] = np.where(classe.isin(CARRO_PROIBIDO), np.inf,
                                  dist_km / gdf["vel_carro"] * 60)
gdf["tempo_pe_min"] = np.where(classe.isin(PE_PROIBIDO), np.inf,
                                dist_km / VELOCIDADE_PEDESTRE_KMH * 60)
```

5. **Parâmetros críticos:** SPEED_DICT: trunk 70 / primary 60 / secondary 50 / tertiary 40 / residential 30 / service-track-living 20 km/h; FATOR_FRICCAO = 0.70; VELOCIDADE_PEDESTRE_KMH = 4.8; CARRO_PROIBIDO = {footway, path, steps, cycleway, pedestrian}; PE_PROIBIDO = {motorway, trunk}.
6. **Reprodutibilidade:** https://github.com/felipedantas-pi/ae2sfca-ubs/blob/main/notebooks/03.1_Calculo_Impedancias.ipynb

APÊNDICE G: 04.1 (ISÓCRONAS)

1. **Objetivo:** Espacializa o alcance dos serviços. Gera, para cada UBS e modo, isócronas de 10/20/30 min em formato de anéis mutuamente exclusivos, incorporando um custo de terminal ao modo motorizado, para alimentar a ponderação de decaimento do AE2SFCA.
2. **Bibliotecas.** city2graph (segments_to_graph, create_isochrone com envoltória côncava); geopandas (diferença geométrica dos anéis); tqdm (progresso); numpy/pandas; mapeprof.
3. **I/O.**
 - a. **Inputs:** zonaUrbana_5km_road_routed.parquet (NB 03.1);
teresina_zonaUrbana_buffer5km_ubs_capacidade.parquet (81 UBS, NB 01.3).
 - b. **Outputs:** zonaUrbana_5km_isocronas_carro.parquet,
zonaUrbana_5km_isocronas_pedestre.parquet;
nb041_cobertura_isocronas.csv.
4. **Função core:** Dois passos do AE2SFCA com apropriação areal da demanda:

```
def gerar_isocronas(nodes, edges, edge_attr, modo, custo_terminal):
    limiares_efetivos = [t - custo_terminal for t in LIMIARES_NOMINAIS]
    saidas = []
    for _, u in tqdm(ubs.iterrows(), total=len(ubs), desc=f"Isócronas ({modo})"):
        iso = c2g_utils.create_isochrone(
            nodes=nodes, edges=edges, center_point=u.geometry,
            threshold=limiares_efetivos, edge_attr=edge_attr,
            method="concave_hull_alpha", hull_ratio=0.15, allow_holes=False,
        ).sort_values("threshold").reset_index(drop=True)
        aneis, anterior = [], None
        for _, r in iso.iterrows():
            aneis.append(r.geometry.difference(anterior) if anterior is not None else
                           r.geometry)
            anterior = r.geometry
        iso["geometry"] = aneis
    ...
```

5. **Parâmetros críticos:** LIMIARES_NOMINAIS = [10,20,30];
CUSTO_TERMINAL_CARRO = 4 (6/16/26 min efetivos),
CUSTO_TERMINAL_PE = 0; envoltória concave_hull_alpha, hull_ratio = 0.15,
allow_holes=False; grafo de roteamento por modo (arestas de tempo finito).
6. **Reprodutibilidade:** https://github.com/felipedantas-pi/ae2sfca-ubs/blob/main/notebooks/04.1_Geracao_Isocronas.ipynb

APÊNDICE H: 05.1 (ÍNDICE AE2SFCA + E2SFCA)

Objetivo: Núcleo analítico da pesquisa. Calcula o índice AE2SFCA (areal) por setor, nos dois modos, e a variante tradicional E2SFCA (centroide) para o teste da H_2 , identificando os "desertos de saúde".

7. **Bibliotecas.** geopandas (interseção overlay, sjoin); mapclassify (quebras dos coropléticos); scipy.stats.spearmanr ; numpy/pandas/matplotlib; mapeprof.

8. **I/O.**

a. **Inputs:** zonaUrbana_5km_isocronas_{carro,pedestre}.parquet (NB 04.1); teresina_zonaUrbana_buffer5km_ubs_capacidade.parquet (NB 01.3); mestre (NB 01.1).

b. **Outputs:** teresina_setores_acessibilidade.parquet (PROCESSADOS); nb051_sintese_indice.csv.

9. **Função core:** Dois passos do AE2SFCA com apropriação areal da demanda:

```
def calcular_ae2sfca(isocronas, setores, oferta):
    iso = isocronas.copy()
    iso["w"] = iso["threshold_nominal"].map(PESOS)
    iso = iso[iso["ubs_id"].isin(oferta[oferta > 0].index)] # descarta S_j <= 0
    (Michels)
    pedacos = gpd.overlay(iso[["ubs_id", "w", "geometry"]],
                          setores[["CD_SETOR", "populacao", "setor_area", "geometry"]],
                          how="intersection", keep_geom_type=False)
    pedacos["frac"] = (pedacos.geometry.area / pedacos["setor_area"]).clip(upper=1.0)
    pedacos["pop_pond"] = pedacos["populacao"] * pedacos["frac"] * pedacos["w"]
    demanda = pedacos.groupby("ubs_id")["pop_pond"].sum() # Passo 1: R_j =
    S_j/demanda
    Rj = (oferta.reindex(demanda.index) / demanda).replace([np.inf, -np.inf],
    np.nan).dropna()
    pedacos["contrib"] = pedacos["ubs_id"].map(Rj) * pedacos["w"] * pedacos["frac"]
    return pedacos.groupby("CD_SETOR")["contrib"].sum() # Passo 2: A_i = Σ R_j
```

10. **Parâmetros críticos:** Pesos de decaimento gaussiano PESOS = {10:1.00, 20:0.68, 30:0.22} (Luo; Qi, 2009); LIMIAR_QUANTIL = 0.25 (deserto = quartil inferior); fração areal saturada em 1,0; índice em equipes por 10 mil habitantes.

11. **Reprodutibilidade:** https://github.com/felipedantas-pi/ae2sfca-ubs/blob/main/notebooks/05.1_%C3%8Dndice_de_Acessibilidade%20AE2SFCA.ipynb

APÊNDICE I: 06.1 (TESTES H1/H2)

Objetivo: Etapa inferencial. Testa a hipótese socioterritorial (H_1 : acessibilidade × renda) e a metodológica (H_2 : areal × centroide), por correlação de postos, reclassificação de desertos e autocorrelação espacial bivariada.

12. **Bibliotecas.** esda (Moran, Moran_BV, Moran_Local_BV); libpysal.weights.KNN (matriz de vizinhança); scipy.stats.spearmanr; numpy/matplotlib; mapeprof.

13. **I/O.**

- a. **Inputs:** teresina_setores_acessibilidade.parquet (NB 05.1); renda mediana do mestre (NB 01.1).
- b. **Outputs:** nb061_h1_sintese.csv, nb061_h2_sintese.csv, nb061_clusters_lisa.csv; figuras de reclassificados, dispersão e LISA.

14. **Função core:** Autocorrelação espacial bivariada local (LISA) acesso × renda:

```
w = KNN.from_dataframe(sub, k=8); w.transform = "r"
moran_bv = Moran_BV(sub["acess_carro"].values, sub["renda_mediana"].values, w)
lisa = Moran_Local_BV(sub["acess_carro"].values, sub["renda_mediana"].values, w,
seed=42)
sub["q"] = lisa.q # quadrante: 1=AA 2=BA 3=BB 4=AB
sub["sig"] = lisa.p_sim < 0.05 # significância por permutação
```

15. **Parâmetros críticos:** Vizinhança KNN(k=8), padronização por linha (transform="r"); significância p_sim < 0.05; seed=42; deserto = quartil inferior; renda mediana (resistente à assimetria).

16. **Reprodutibilidade:** https://github.com/felipedantas-pi/ae2sfca-ubs/blob/main/notebooks/06.1_Testes_das_Hipoteses.ipynb