



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS**  
**DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA**  
**CURSO DE BACHARELADO EM GEOGRAFIA**

**KLINSMAN GLEDSON GUIMARÃES DE ARAUJO**

**IMPACTOS DO ESPRAIAMENTO LOGÍSTICO NA EMISSÃO DE POLUENTES**  
**ATMOSFÉRICOS DECORRENTE DO TRANSPORTES DE CARGAS**

**FORTALEZA**  
**2025**

KLINSMAN GLEDSON GUIMARÃES DE ARAUJO

IMPACTOS DO ESPRAIAMENTO LOGÍSTICO NA EMISSÃO DE POLUENTES  
ATMOSFÉRICOS DECORRENTE DO TRANSPORTES DE CARGAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Geografia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Geografia.

Orientador: Prof. Dr. Bruno Vieira Bertoncini.

FORTALEZA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

A689i Araujo, Klinsman Gledson Guimarães de.  
Impactos do espraiamento logístico na emissão de poluentes atmosféricos decorrente do transportes de cargas / Klinsman Gledson Guimarães de Araujo. – 2025.  
54 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Curso de Geografia, Fortaleza, 2025.  
Orientação: Prof. Dr. Bruno Vieira Bertoncini.

1. Espraiamento logístico. 2. Transporte urbano de cargas. 3. Poluição atmosférica. 4. Planejamento sustentável. 5. Cidade de 15 minutos. 6. Fortaleza, Região Metropolitana de (CE). I. Título.

CDD 910

---

KLINSMAN GLEDSON GUIMARÃES DE ARAUJO

IMPACTOS DO ESPRAIAMENTO LOGÍSTICO NA EMISSÃO DE POLUENTES  
ATMOSFÉRICOS DECORRENTE DO TRANSPORTES DE CARGAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Geografia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Geografia.

Orientador: Prof. Dr. Bruno Vieira Bertoncini.

Aprovado em: 13/03/2025.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Bruno Vieira Bertoncini (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Thiago Iachiley Araujo de Souza  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Me. Luis Felipe Santos Moura  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador Prof. Dr. Bruno Vieira Bertoncini, pela orientação, apoio e paciência durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Carlos Henrique Sopchaki, pelo apoio durante minha formação e pela apresentação ao mundo do SIG e do Geoprocessamento.

Aos meus queridos amigos que fiz durante a minha graduação, Carlos Eduardo, Ezequias, Hernany, José Carlos, Luis Felipe, Michael, Nilo, Rogerio e Wellington, que, sem sua presença e companheirismo jamais chegaria onde estou.

Ao meu estágio na Secretaria Municipal de Finanças de Fortaleza – SEFIN, onde pude aprender finalmente a importância e o uso de meus conhecimentos, além das oportunidades, aprendizados e amizades que me proporcionaram e continuam a proporcionar, agora como funcionário.

Aos colegas e professores do grupo de Transportes e Meio Ambiente – TRAMA, que me mostraram o lado bom da pesquisa acadêmica, e me devolveram a sensação de pertencimento à universidade.

A minha família, por sempre estar do meu lado, nos momentos bons e nos difíceis, minha mãe Lucilane, meu pai Gilson e meu irmão Kennedy, e tios e avós, que, mesmo com algumas partidas continuam vivos no meu coração.

## RESUMO

O espraiamento logístico e a fragmentação urbana resultam no aumento das distâncias percorridas por veículos de carga, elevando as emissões de poluentes atmosféricos. Na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), a descentralização dos centros logísticos para áreas periféricas tem intensificado esses efeitos. Como alternativa a esse modelo de expansão desordenada, o conceito da Cidade de 15 Minutos, já adotado em cidades como Paris, surge como uma estratégia de planejamento urbano capaz de reduzir deslocamentos e mitigar impactos ambientais. Este estudo investiga a relação entre a dispersão dos centros logísticos e o crescimento das emissões, analisando a evolução da urbanização e da atividade logística ao longo das últimas seis décadas. A metodologia empregada baseou-se em técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto para mapear a expansão da mancha urbana e a localização dos principais polos geradores de carga, com ênfase em atacadistas de alimentos, a partir dos quais foram aplicadas isócronas de 15 minutos, considerando deslocamentos a 35 km/h para avaliar a acessibilidade logística e sua relação com a emissão de poluentes. Como métrica, utilizou-se a concentração de material particulado fino (PM<sub>2.5</sub>), obtida por modelagem atmosférica. Os resultados indicam que, entre 1980 e 2020, houve um grande aumento da área urbanizada na RMF, e que, a partir dos anos 2000, o espraiamento logístico intensificou-se, reduzindo a cobertura dessas áreas dentro da isócrona de 15 minutos e ampliando significativamente as distâncias percorridas, o que contribuiu para a piora da qualidade do ar. A análise revelou que as zonas de 15 minutos apresentaram uma menor concentração média de poluentes, evidenciando o potencial desse modelo como alternativa para mitigar os impactos ambientais do transporte de carga. Conclui-se que a integração entre planejamento urbano e logística sustentável é essencial para reduzir as emissões e melhorar a qualidade de vida na RMF, destacando a necessidade de políticas públicas voltadas à mobilidade urbana e ao controle ambiental.

**Palavras-chave:** espraiamento logístico; poluição atmosférica; transporte urbano de cargas; cidade de 15 minutos; planejamento sustentável.

## ABSTRACT

The logistical sprawl and urban fragmentation result in increased travel distances for freight vehicles, leading to higher emissions of atmospheric pollutants. In the Metropolitan Region of Fortaleza (RMF), the decentralization of logistics centers to peripheral areas has intensified these effects. As an alternative to this model of uncontrolled expansion, the concept of the 15-Minute City, already adopted in cities such as Paris, emerges as an urban planning strategy capable of reducing travel distances and mitigating environmental impacts. This study investigates the relationship between the dispersion of logistics centers and the growth of emissions, analyzing the evolution of urbanization and logistics activities over the past six decades. The methodology employed is based on geoprocessing and remote sensing techniques to map the expansion of the urban area and the location of major freight-generating hubs, with an emphasis on food wholesalers. From these points, 15-minute isochrones were applied, considering travel at 35 km/h to assess logistics accessibility and its relationship with pollutant emissions. As a metric, the concentration of fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) was obtained through atmospheric modeling. The results indicate that, between 1980 and 2020, there was a significant increase in the urbanized area in the RMF, and that since the 2000s, logistics sprawl has intensified, reducing coverage within the 15-minute isochrone and significantly increasing travel distances, contributing to the deterioration of air quality. The analysis revealed that the 15-minute zones had a lower average concentration of pollutants, highlighting the potential of this model as an alternative to mitigate the environmental impacts of freight transport. It is concluded that the integration of urban planning and sustainable logistics is essential to reduce emissions and improve the quality of life in the RMF, emphasizing the need for public policies aimed at urban mobility and environmental control.

**Keywords:** logistical sprawl; air pollution; urban freight transport; 15-minute city; sustainable planning.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	– Processo metodológico da Análise.....	24
Figura 2	– Ordem do processo de criação das isócronas.....	30
Gráfico 1	– Evolução do percentual de Área Urbanizada na RMF entre 1980 e 2020.....	35
Gráfico 2	– Evolução da quantidade de atacadistas de alimentos na RMF entre 1970 e 2020.....	39
Gráfico 3	– Evolução proporcional da quantidade de atacadistas de alimentos nos municípios originais da RMF entre 1970 e 2020.....	39
Gráfico 4	– Evolução da quantidade de varejo de alimentos nos municípios originais da RMF entre 1970 e 2020.....	40
Gráfico 5	– Evolução da quantidade de varejo de alimentos nos municípios originais da RMF entre 1970 e 2020.....	42
Gráfico 6	– Cobertura da Mancha Urbana a Até 15 Minutos de um Atacado de Alimentos.....	46

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Dados populacionais das principais cidades da RFM (Censo).....	18
Tabela 2	– Evolução do percentual de Area Urbanizada na RMF (1980-2020)...	35
Tabela 3	– Evolução da Mancha urbana a 15 minutos de um atacado de alimento.....	45
Tabela 4	– Relação Concentração Superficial de PM2.5 [ug/m3] em Zonas Tempo de Entrega 15 minutos, Zonas Urbanizadas e Área Total dos Municípios.....	50

## LISTA DE MAPAS

Mapa 1	– Localização da Área de Estudo.....	15
Mapa 2	– Evolução das manchas urbanas na RMF entre 1970 e 2020.....	33
Mapa 3	– Evolução das localizações de atacados de alimentos na RMF entre 1970 e 2020.....	37
Mapa 4	– Evolução do tempo de entrega de atacado de alimento nos municípios originais da RMF entre 1970 e 2020.....	43
Mapa 5	– Estimativas da Concentração Superficial de PM2.5 [ug/m3] na RMF em 2007.....	47
Mapa 6	– Estimativas da Concentração Superficial de PM2.5 [ug/m3] na RMF em 2012.....	47
Mapa 7	– Estimativas da Concentração Superficial de PM2.5 [ug/m3] na RMF em 2022.....	48
Mapa 8	– Relação Tempo de Entrega / Concentração de PM2.5 na RMF em 2007.....	49
Mapa 9	– Relação Tempo de Entrega / Concentração de PM2.5 na RMF em 2012.....	49
Mapa 10	– Relação Tempo de Entrega / Concentração de PM2.5 na RMF em 2022.....	50

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	12
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	15
2.1	Histórico de Criação da RMF.....	15
2.2	Logística Urbana e Transporte de Carga na RMF.....	18
2.2.1	Impactos dos Planos Diretores.....	19
<b>2.3</b>	<b>Emissões de Poluentes na RMF</b> .....	20
<b>2.4</b>	<b>Cidades de 15 minutos</b> .....	21
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	24
<b>3.1</b>	<b>Aquisição dos dados</b> .....	24
<b>3.2</b>	<b>Geração das Manchas Urbanas</b> .....	26
<b>3.3</b>	<b>Geração das Isócronas</b> .....	29
<b>3.4</b>	<b>Aquisição de Dados de Estimativa de PM2.5</b> .....	31
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	33
<b>4.1</b>	<b>Expansão da Mancha Urbana e Espreadimento</b> .....	33
<b>4.2</b>	<b>Localização dos Geradores de carga</b> .....	35
<b>4.3</b>	<b>Evolução do tempo de entrega</b> .....	43
<b>4.4</b>	<b>Relação Zonas de 15 minutos / Concentração de PM 2.5</b> .....	46
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	51
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	54

## 1 INTRODUÇÃO

O crescimento urbano desordenado e a expansão das atividades logísticas para áreas periféricas têm gerado uma série de desafios ambientais nas grandes cidades. Na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), esses fenômenos, conhecidos como espraiamento urbano e logístico, têm implicado diretamente no aumento das emissões de poluentes atmosféricos, especialmente em função das longas distâncias percorridas por veículos de carga. Conforme destacado por Santos (1994), a transformação urbana nas metrópoles brasileiras, incluindo Fortaleza, é amplamente influenciada pelo "meio técnico-científico-informacional", que reestrutura o espaço urbano e gera dinâmicas de ocupação do solo.

O rápido crescimento populacional da RMF, que passou de aproximadamente 857 mil habitantes em 1970 para cerca de 3,9 milhões em 2022 (IBGE, 2022), intensificou esses desafios, criando uma vasta mancha urbana que avança sobre áreas periféricas sem a infraestrutura necessária. O Porto do Pecém e o Distrito Industrial de Maracanaú têm sido cruciais nesse processo, promovendo a descentralização das atividades econômicas e contribuindo para o espraiamento logístico, que, segundo Dablanc e Rakotonarivo (2010), aumenta significativamente as distâncias percorridas pelos veículos de carga e, conseqüentemente, as emissões de poluentes.

Nesse cenário de expansão urbana desordenada, surgem também conceitos que se contrapõem a esse desenvolvimento, como a proposta das "Cidades de 15 Minutos", introduzida por Carlos Moreno (2021). Esse modelo defende um planejamento urbano em que todas as necessidades diárias dos cidadãos possam ser atendidas em um raio de 15 minutos, a pé ou de bicicleta, reduzindo significativamente a dependência de veículos motorizados e promovendo maior sustentabilidade.

Os veículos pesados movidos a diesel, amplamente utilizados no transporte de cargas, são uma das principais fontes de poluição local no Brasil. Segundo o IPEA (2011), esses veículos são responsáveis pelas emissões de materiais particulados (MP) e óxidos de nitrogênio (NOx), poluentes diretamente associados à queima de diesel. Esses poluentes têm efeitos severos na qualidade do ar e na saúde pública, incluindo problemas respiratórios, formação de smog fotoquímico e chuva ácida. Além disso, causam impactos negativos no entorno de corredores logísticos, como a degradação de imóveis adjacentes e a redução da qualidade de vida da população.

O Inventário Nacional de Emissões de Gases de Efeito Estufa (2022) reforça que o setor de transportes, especialmente em áreas urbanas como a RMF, é uma das principais

fontes de emissões de CO<sub>2</sub> e outros poluentes atmosféricos. Além disso, a concentração de MPs ao longo de corredores saturados por veículos pesados intensifica os impactos ambientais e sociais, afetando a saúde, o meio ambiente e o mercado imobiliário.

Diante disso, o modelo de "Cidade de 15 Minutos" surge como uma oportunidade para mitigar esses impactos. Ao priorizar a proximidade entre moradia, trabalho e serviços essenciais, esse conceito pode reduzir a necessidade de deslocamentos motorizados e, conseqüentemente, as emissões de poluentes. Promover cidades mais compactas e conectadas não apenas melhora a qualidade de vida, mas também contribui para um planejamento urbano mais sustentável.

Considerando a relevância da logística para o desenvolvimento econômico, compreender os impactos desse espraiamento nas emissões de poluentes atmosféricos é essencial para o planejamento urbano sustentável. O tema se insere em uma discussão acadêmica relevante, que busca alinhar eficiência logística com práticas ambientalmente responsáveis, e tem aplicação prática nas políticas públicas voltadas à mobilidade urbana e ao controle da poluição atmosférica.

O problema de pesquisa a ser abordado neste estudo é: Como o espraiamento logístico contribui para o aumento das emissões de poluentes atmosféricos na RMF, em decorrência do transporte de cargas? Para responder a essa questão, será investigada a relação entre a dispersão dos centros logísticos e o aumento das distâncias percorridas pelos veículos de carga, com foco nas emissões geradas por esse deslocamento.

O objetivo geral deste estudo é analisar os impactos do espraiamento logístico na emissão de poluentes atmosféricos na RMF, identificando as áreas mais afetadas e quantificando as emissões associadas. Especificamente, pretende-se: (i) mapear a expansão das atividades logísticas na RMF ao longo das últimas décadas; (ii) investigar o espraiamento logístico ao longo das décadas; (iii) avaliar as possíveis soluções logísticas que a cidade de 15 minutos traz para mitigar esses impactos.

A relevância deste estudo está diretamente ligada à necessidade de promover uma logística urbana mais eficiente e sustentável, diante do crescimento contínuo das áreas urbanas periféricas. Além de contribuir para o avanço do conhecimento acadêmico sobre o tema, os resultados desta pesquisa poderão orientar políticas públicas para a redução das emissões de poluentes e a melhoria da qualidade de vida na região.

A estrutura deste trabalho está organizada da seguinte forma: no capítulo 2, será apresentado o referencial teórico, contextualizando os conceitos de espraiamento urbano e logístico na RMF. No capítulo 3, será detalhada a metodologia utilizada na pesquisa, com

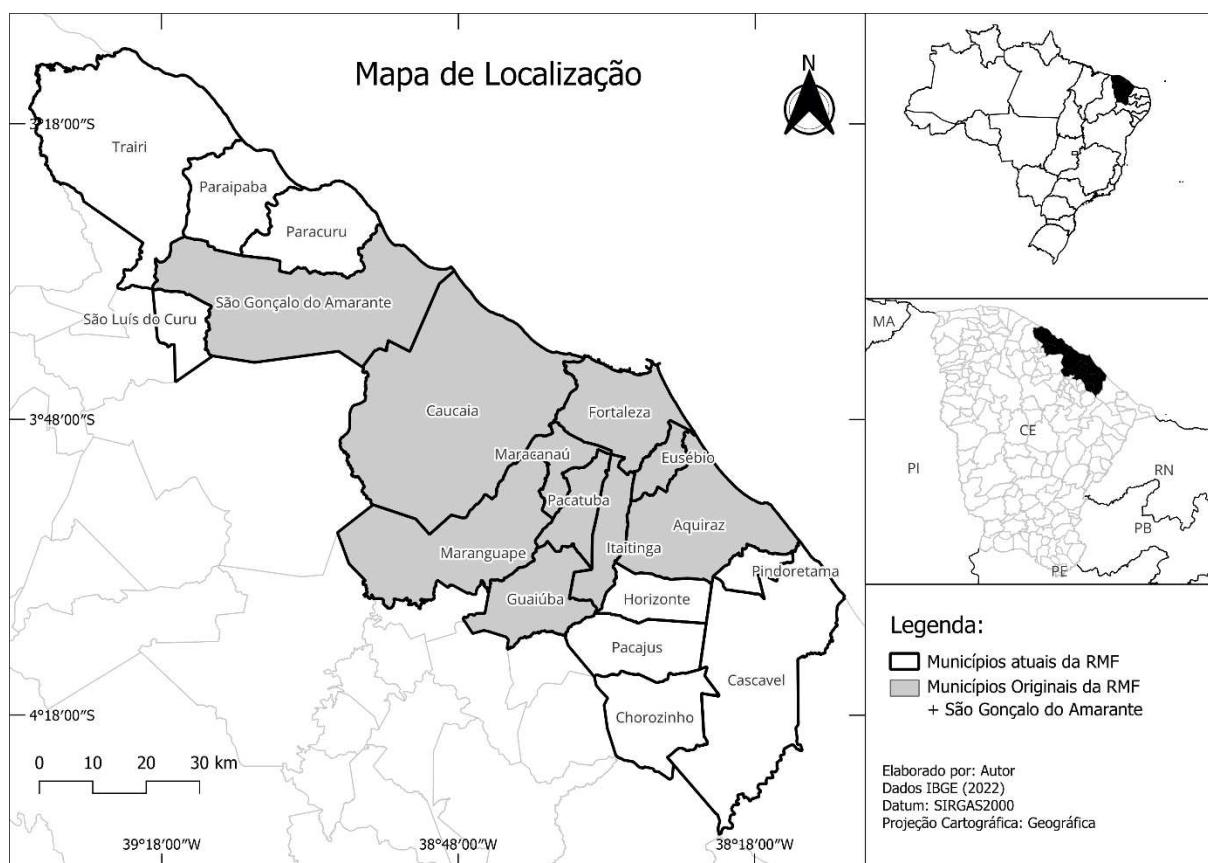
foco na coleta de dados e análise espacial por meio de técnicas de geoprocessamento. O capítulo 4 trará os resultados obtidos a partir das análises, enquanto o capítulo 5 apresentará as conclusões, indicando propostas de soluções para os problemas identificados.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Histórico de Criação da RMF

O processo de transformação urbana nas metrópoles brasileiras ao longo das últimas décadas, que inclui a cidade de Fortaleza, tem sido significativamente marcado pelo avanço do "meio técnico-científico-informacional", conforme descreve Santos (1994). Esse conceito abrange a integração de tecnologias modernas, redes de comunicação e mudanças nos processos produtivos que reestruturam o espaço urbano e criam dinâmicas de ocupação e uso do solo. Em Fortaleza, essas mudanças se manifestaram através do rápido crescimento populacional e urbano, haja vista que a população da cidade aumentou de, aproximadamente, 857 mil habitantes, em 1970, para cerca de 2,4 milhões, em 2022 (IBGE, 2022). A RMF, por sua vez, concentra atualmente cerca de 3,9 milhões de habitantes que representa 44% de toda a população do estado do Ceará (IBGE, 2022).

Mapa 1 – Localização da Área de Estudo



Fonte: Adaptado de IBGE (2022)

A Região Metropolitana de Fortaleza, também conhecida como Grande Fortaleza, oficializada pela Lei Complementar nº 14, de 8 de junho de 1973, foi composta inicialmente

por Fortaleza e os municípios que faziam divisa direta com a capital: Caucaia, Maranguape, Pacatuba e Aquiraz. Posteriormente, com a emancipação de algumas áreas, foram incorporados, também, os municípios de Maracanaú, Eusébio, Itaitinga e Guaiuba. Em 1999, a região foi expandida pela Lei Complementar nº 18, de 29 de dezembro de 1999, que incluiu os municípios que não faziam fronteira direta com Fortaleza São Gonçalo do Amarante, Pacajus, Horizonte e Chorozinho. Na década seguinte, Pindoretama e Cascavel foram integrados à macrorregião, pela Lei Complementar nº 78, de 26 de junho de 2009. A última atualização, até a elaboração deste trabalho, ocorreu em 2014, com a inclusão dos municípios de Paracuru, Paraipaba, Trairi e São Luís do Curu, conforme a Lei Complementar nº 154, de 20 de outubro de 2014.

Devido às mudanças nos limites da macrorregião ao longo das últimas cinco décadas, a população da RMF passou por alterações significativas, especialmente nos municípios que compõem a região original. Um destaque nesse contexto é São Gonçalo do Amarante, que se beneficiou da implantação do Porto do Pecém. Conforme discutido por Pequeno e Costa (2018), o Porto do Pecém e o Distrito Industrial de Maracanaú foram fundamentais para a expansão descentralizada da zona urbana da RMF, contribuindo para o desenvolvimento econômico e a redistribuição populacional na área

O Porto do Pecém impulsionou o crescimento econômico e logístico da região ao atrair investimentos industriais e se consolidou como um polo estratégico para exportações. Essa atividade, anteriormente restrita à capital Fortaleza, pelo porto do Mucuripe, foi descentralizada para a região metropolitana, levando à redistribuição das atividades econômicas e logísticas para áreas periféricas e promovendo um novo dinamismo econômico nas cidades vizinhas.

Esse processo de descentralização alterou a configuração espacial e modificou as rotas de transporte e o fluxo de mercadorias. Essa mudança contribuiu para o aumento do espraiamento urbano e logístico. As novas infraestruturas, como o Complexo Industrial e Portuário do Pecém, redefiniram o papel de São Gonçalo do Amarante na rede metropolitana, transformando-o em um centro emergente de atividades industriais e logísticas, além de ajudar a aliviar a sobrecarga da infraestrutura urbana do centro de Fortaleza.

O Distrito Industrial de Maracanaú, por sua vez, desempenhou um papel estratégico na reorganização econômica da RMF, ao criar um ambiente favorável para a instalação de grandes empresas, graças a incentivos fiscais, disponibilidade de terrenos e infraestrutura adequada. A construção do Quarto Anel Viário foi crucial para conectar o distrito diretamente ao Porto do Pecém, o que melhorou significativamente a logística regional. Esse anel viário,

que se estende por 32 km, conecta importantes rodovias como a BR-116, BR-222, CE-010, e CE-040, e facilita o escoamento de produtos e a consolidação de Maracanaú como um eixo central na rede de circulação de mercadorias da RMF.

Estes municípios apresentaram crescimento populacional significativo ao longo das últimas décadas, além de Fortaleza mencionada anteriormente, Caucaia, experimentou um crescimento expressivo de 54.754 habitantes em 1970 para 355.679 em 2022 (IBGE, 2022), impulsionado pela expansão urbana e pela atração de novas indústrias e serviços. Maracanaú, criado como município nos anos 1980, tornou-se um polo industrial significativo, e teve sua população aumenta de 159.532, em 1990, para 234.509, em 2022 (IBGE, 2022). Esse crescimento está fortemente associado à presença do Distrito Industrial, que promoveu a instalação de diversas empresas na área, gerando empregos e atraindo novos moradores para a região.

Municípios como Eusébio e Itaitinga, também, apresentaram expressivas taxas de crescimento populacional e se destacaram pelo espraiamento residencial, com atração de novos empreendimentos imobiliários, especialmente, condomínios fechados voltados para classes de maior poder aquisitivo. Além da presença do Quarto Anel Viário, que, junto a incentivos fiscais, tem atraído cada vez mais centros de distribuição de grandes varejistas online, como Amazon, Mercado livre e Magazine Luiza, segmento que teve um drástico aumento na última década em razão de mudanças de hábitos de consumo, que foram impulsionados durante o período da pandemia do COVID19, que com o *lockdown* forçou as populações a optar por esse tipo de compra.

Eusébio, cresceu de 27.103 habitantes em 1990, primeira década desde sua oficialização emancipação como município em 1987, para 74.170 em 2022 (IBGE, 2022), refletindo seu papel como área de expansão para moradores de renda mais alta que buscam residências fora do centro urbano de Fortaleza, destaque para o loteamento fechado, Alphaville Fortaleza, localizado no município que possuem dezenas de casas avaliadas em mais de R\$ 10.000.000,00 durante a elaboração deste trabalho.

Enquanto Itaitinga onde grandes partes desses armazéns de distribuição se localizam, sua população mais que dobrou, desde sua emancipação em 1992, sendo um aumento de mais de 121% indo de 29.217 em 2000 para 64.650 em 2020, sendo um aumento de 80% só na última década.

Tabela 1 – Dados populacionais das principais cidades da RFM (Censo)

<b>Município</b>	<b>1970</b>	<b>1980</b>	<b>1990</b>	<b>2000</b>	<b>2010</b>	<b>2020</b>
<b>Fortaleza</b>	857.980	1.307.608	1.954.656	2.141.402	2.452.185	2.428.708
<b>Caucaia</b>	54.754	94.106	208.678	250.479	325.441	355.679
<b>Maranguape</b>	59.622	91.137	81.613	88.135	113.561	105.093
<b>Pacatuba</b>	31.916	42.106	43.532	51.696	72.299	81.524
<b>Aquiraz</b>	32.507	45.112	51.126	60.469	72.628	80.645
<b>Maracanaú</b>	*	*	159.532	179.732	209.057	234.509
<b>Eusébio</b>	*	*	27.103	31.500	46.033	74.170
<b>Itaitinga</b>	*	*	*	29.217	35.817	64.650
<b>Guaiuba</b>	*	*	17.047	19.884	24.091	24.235
<b>São Gonçalo do Amarante</b>	21.003	24.694	32.600	35.608	43.890	54.143

Fonte: Adaptado de IBGE (2022)

Nota: \* Os municípios ainda não haviam sido emancipados nos indicados.

Esse crescimento acelerado tem imposto desafios significativos ao planejamento urbano, uma vez que a expansão da cidade tem ocorrido predominantemente de forma horizontal e desordenada, com a formação de uma vasta mancha urbana que avança sobre áreas periféricas sem a infraestrutura necessária para suportar o aumento da população. A expansão descontrolada, também conhecida como espraiamento urbano, resulta na ocupação de áreas rurais ou subutilizadas, muitas vezes sem a presença de serviços essenciais, como saneamento básico, transporte público adequado e acesso a saúde e educação (Costa; Amora, 2015).

## 2.2 Logística Urbana e Transporte de Carga na RMF

O espraiamento urbano de Fortaleza é caracterizado pela fragmentação do tecido urbano, criando áreas de baixa densidade e pouco conectadas, que dificultam a oferta de transporte público eficiente e modos sustentáveis de deslocamento, como caminhar ou pedalar. Essa configuração espacial agrava as desigualdades no acesso a serviços e oportunidades, gerando uma cidade dividida em termos socioeconômicos e de acessibilidade. Enquanto a população de alta renda tende a se concentrar em áreas bem equipadas e servidas, as camadas de baixa renda são relegadas a regiões com menor infraestrutura e acesso limitado a oportunidades de emprego (Lima et al., 2021).

Além do espraiamento residencial, Fortaleza também vivencia o espraiamento logístico, que se refere à dispersão das atividades logísticas para áreas periféricas. Esse fenômeno é impulsionado pela busca por terrenos mais baratos e acessíveis, melhor conectividade rodoviária e a necessidade de grandes espaços para a instalação de centros de distribuição e depósitos. Contudo, essa dispersão contribui para o aumento do tráfego de veículos de carga, elevando as emissões de poluentes e agravando os congestionamentos em áreas urbanas.

Estudos anteriores demonstram que, em cidades como Paris, a descentralização dos terminais de transporte de mercadorias para áreas periféricas resultou em um aumento significativo das distâncias percorridas pelos veículos de carga e, conseqüentemente, em um acréscimo nas emissões de poluentes. Destaca-se o caso do CO<sub>2</sub>, cujas emissões aumentaram em cerca de 15 mil toneladas anuais devido à dispersão logística na região metropolitana (Dablanc & Rakotonarivo, 2010). Da mesma forma, estudos sobre a logística urbana em Fortaleza revelam que o espraiamento logístico não apenas amplia as distâncias percorridas pelos veículos de carga, mas também impacta diretamente a eficiência das entregas e a sustentabilidade urbana (Lima et al., 2021).

### 2.2.1 Impactos dos Planos Diretores

Os planos diretores de Fortaleza desempenharam um papel fundamental na definição do desenvolvimento urbano e logístico da cidade ao longo das décadas, especialmente na moldagem da RMF. Entre eles, o Plano Diretor de 1972 se destacou como um dos mais influentes, devido ao seu foco na funcionalidade da cidade em uma escala metropolitana. Conforme destacado por Cavalcante et al. (2020), esse plano priorizou ações diretamente relacionadas ao transporte, como a criação de ligações viárias metropolitanas radiocêntricas e a construção de um anel rodoviário metropolitano. Essas iniciativas visaram conectar as novas áreas habitacionais ao centro urbano, facilitando o escoamento do tráfego e integrando economicamente as periferias. No entanto, essas ações também contribuíram para o deslocamento das atividades econômicas para fora do centro e para o aumento das viagens motorizadas, reforçando padrões de urbanização dispersa e segregação socioespacial.

Além dessas diretrizes voltadas à expansão viária e à integração metropolitana, o Plano Diretor de 1972 também propôs medidas voltadas ao transporte de carga, incluindo a retirada do transporte ferroviário de passageiros e sua transferência para uma área periférica, além da criação de conexões estratégicas entre as linhas férreas sul e norte (Cavalcante et al., 2020). No entanto, essas intervenções favoreceram principalmente o modal rodoviário,

ampliando a dependência do transporte de cargas por caminhões e, conseqüentemente, contribuindo para o aumento da circulação desses veículos nas áreas urbanas e metropolitanas

Já o Plano Diretor de 2009 introduziu o conceito de "Desenvolvimento Urbano Sustentável", com o objetivo de promover uma ocupação mais ordenada e compacta e melhorar a infraestrutura de transportes. O plano buscava adequar a mobilidade urbana às diretrizes de uso do solo, investindo em projetos estratégicos como o METROFOR e o TRANSFOR, que visavam aprimorar o transporte coletivo e reduzir a dependência do transporte individual. No entanto, a implementação dessas diretrizes enfrentou desafios significativos, resultando em uma aplicação limitada das propostas e na persistência de problemas como a urbanização dispersa, a falta de integração efetiva entre o uso do solo e a mobilidade urbana, e uma contínua predominância de deslocamentos motorizados, que contribuem para a sobrecarga da infraestrutura viária e para o aumento das emissões de poluentes na cidade.

Em relação ao transporte de carga, o Plano Diretor de 2009 avançou ao reconhecer a necessidade de disciplinamento da circulação de veículos pesados e das operações de carga e descarga (Cavalcante et al., 2020). O plano também estabeleceu diretrizes para a definição de horários específicos para carga e descarga em áreas urbanas, buscando minimizar os impactos do transporte de mercadorias no trânsito da cidade. Contudo, a ausência de uma política mais integrada entre transporte e logística impediu uma transformação estrutural significativa na organização do setor.

A descentralização das atividades econômicas sem uma gestão coordenada resultou na ampliação do espraiamento logístico, aumentando a distância percorrida pelos veículos de carga e agravando os problemas ambientais e de congestionamento. Embora o Plano Diretor de 2009 tenha introduzido diretrizes para disciplinar a circulação de veículos pesados, a ausência de uma abordagem integrada entre transporte, logística e planejamento urbano impediu avanços significativos na organização do setor. Dessa forma, o transporte de carga continua fortemente dependente da infraestrutura rodoviária, contribuindo para a sobrecarga da malha viária e a intensificação dos deslocamentos motorizados, especialmente em áreas periféricas da RMF

### 2.3 Emissões de Poluentes na RMF

O espraiamento urbano e logístico em Fortaleza reflete a complexidade das dinâmicas socioespaciais influenciadas tanto por decisões individuais quanto por políticas públicas de infraestrutura e transporte. Esse fenômeno, que inclui a expansão desordenada das áreas urbanas e a dispersão das atividades logísticas para as periferias, aumentou significativamente as distâncias percorridas pelos veículos de carga, resultando em maior emissão de poluentes. De acordo com Dablanc e Rakotonarivo (2010), o fenômeno de *logistic sprawl* (espraiamento logístico) pode adicionar milhares de toneladas de CO<sub>2</sub> por ano, uma vez que os veículos percorrem distâncias maiores para alcançar os centros de distribuição e os pontos finais de entrega.

Além do aumento das emissões de CO<sub>2</sub>, a queima do óleo diesel, principal combustível utilizado no transporte rodoviário no Brasil, resulta na liberação de poluentes atmosféricos nocivos, como material particulado (MP) e óxidos de nitrogênio (NOx). Esses poluentes afetam diretamente a qualidade do ar e estão associados a impactos negativos na saúde pública, incluindo o aumento da incidência de doenças respiratórias e cardiovasculares. Segundo Canan (2022), a queima de óleo diesel em áreas urbanas pode intensificar a poluição atmosférica, expondo a população a substâncias cancerígenas e tóxicas, aumentando o risco de complicações respiratórias como asma e bronquite.

De acordo com o Inventário Nacional de Emissões de GEE (MCTI, 2022), o transporte rodoviário é uma das maiores fontes de emissões dentro do setor de energia no Brasil, sendo o diesel o combustível mais consumido, especialmente em veículos pesados, como caminhões e ônibus. O relatório destaca que esse setor é responsável pela liberação de grandes volumes de CO<sub>2</sub> e outros poluentes atmosféricos, impulsionados pelo alto consumo de combustíveis fósseis.

Na RMF, a desconcentração das atividades econômicas, com a criação de polos como o Porto do Pecém e o Distrito Industrial de Maracanaú, contribuiu para esse aumento, intensificando o tráfego e o consumo de combustíveis fósseis, principalmente o diesel. O espraiamento urbano e logístico, portanto, agrava desafios ambientais, ao elevar as emissões de CO<sub>2</sub> e outros poluentes, impactando não apenas o clima, mas também a qualidade do ar e a saúde da população. Esse cenário reforça a necessidade de integrar planejamento urbano e logístico, a fim de reduzir as distâncias percorridas, minimizar os impactos ambientais e melhorar a mobilidade urbana na RMF.

#### 2.4 Cidades de 15 minutos

Modelos como a Cidade de 15 Minutos (15-MC) propõem a reorganização urbana para garantir que os cidadãos tenham acesso à moradia, trabalho, serviços essenciais e lazer em um raio de até quinze minutos a pé ou de bicicleta (MORENO et al., 2021). Essa abordagem busca reduzir deslocamentos longos, minimizando o tráfego de veículos de carga e, conseqüentemente, as emissões de poluentes associadas ao transporte de mercadorias. Segundo Moreno et al. (2021), a implementação desse modelo pode diminuir significativamente a dependência do transporte rodoviário, promovendo o uso de meios mais sustentáveis, como bicicletas, transporte público e veículos elétricos, tanto para passageiros quanto para logística urbana.

A implementação da Cidade de 15 Minutos (15-MC), já adotada em cidades como Paris, Oxford e Milão (POMIANEK, 2023), está diretamente ligada à eficiência logística, pois favorece a descentralização controlada das atividades econômicas e a localização estratégica de hubs logísticos mais próximos dos centros urbanos. Isso ajudaria a evitar a expansão excessiva das áreas periféricas e a longas viagens para o transporte de mercadorias, promovendo uma logística mais eficiente e de menor impacto ambiental. Esse modelo contribuiria para a redução dos deslocamentos necessários para o transporte de mercadorias. Como consequência, haveria uma diminuição no tráfego de veículos pesados e nos impactos ambientais associados à queima de combustíveis fósseis, especialmente o diesel. Segundo Dablanc e Rakotonarivo (2010), a reorganização das atividades logísticas dentro de um modelo de cidade compacta pode reduzir significativamente o volume de caminhões em circulação, melhorando a eficiência do transporte urbano e minimizando as emissões de poluentes.

Nesse sentido, Barbieri et al. (2023) aprofundam a análise da Cidade de 15 Minutos aplicando um método quantitativo baseado em modelagem de grafos espaciais para medir a acessibilidade urbana em três cidades europeias: Paris, Londres e Roma. A pesquisa avaliou a facilidade de acesso aos serviços essenciais considerando todos os caminhos possíveis em redes urbanas pedestres e estabelecendo um Índice de Cidade de 15 Minutos, que mensura o grau de conectividade entre residências e serviços urbanos em um raio de deslocamento a pé. Os resultados demonstraram que Paris e Londres possuem uma estrutura mais integrada e adequada ao modelo 15-MC, enquanto Roma apresenta fragmentação no acesso, com áreas desconectadas dos principais serviços.

Além da acessibilidade para pessoas, a infraestrutura logística dentro da 15-MC desempenha um papel fundamental na otimização do transporte de cargas. Pomianek (2023) destaca que a reorganização do espaço urbano com base na 15-MC traz diversos benefícios

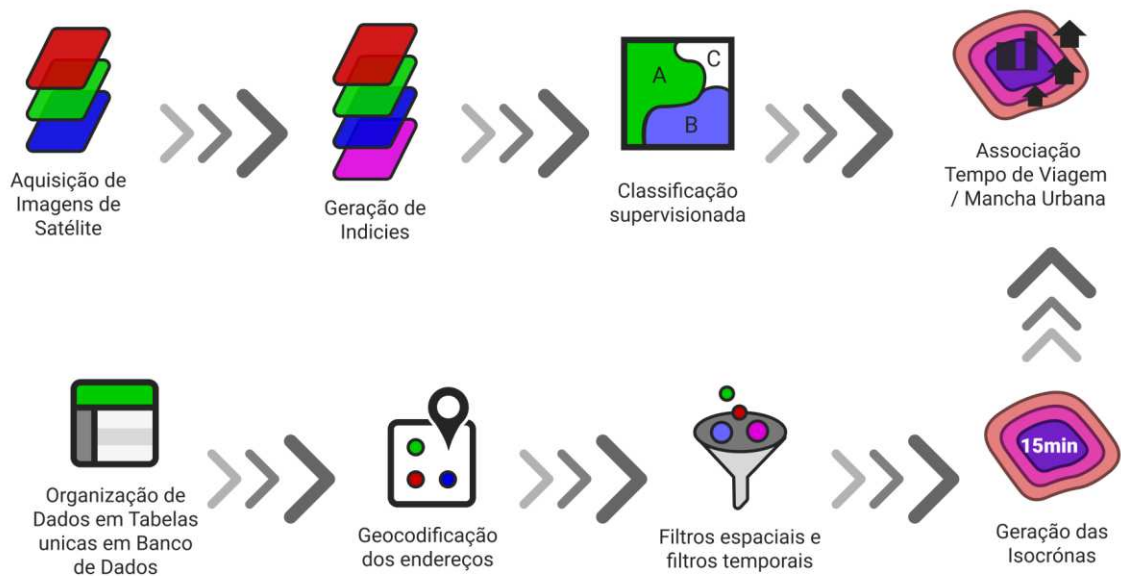
tanto à cidade quanto aos cidadãos ao reduzir a dependência de veículos motorizados, o que leva a menos engarrafamentos e sobrecarga do sistema viário, reduzindo o tempo de viagens, além de contribuir para a redução das emissões de carbono e para a criação de mais espaços livres de veículos. A menor circulação de automóveis e caminhões no interior das cidades permite que parte das vias seja transformada em ciclovias ou áreas verdes, promovendo um ambiente urbano mais sustentável e melhorando a qualidade do ar.

Essa abordagem se alinha à análise de Dablanc e Rakotonarivo (2010), que demonstraram que a redução da dispersão logística e a realocação estratégica de terminais de transporte podem minimizar a circulação de caminhões, reduzindo emissões de CO<sub>2</sub> e congestionamentos urbanos. Além disso, o modelo da 15-MC favorece um planejamento urbano mais equitativo, otimizando o uso dos espaços urbanos e tornando o transporte de mercadorias mais eficiente, ao reduzir trajetos desnecessários e minimizar os impactos negativos do tráfego intenso nas cidades.

Portanto, o planejamento urbano focado na proximidade e na descentralização controlada, como no modelo da "Cidade de 15 Minutos", surge como uma estratégia eficaz para reduzir o impacto ambiental do espraiamento logístico, promovendo uma cidade mais sustentável e resiliente às mudanças climáticas.

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

Figura 1 – Processo metodológico da Análise



Fonte: elaborada pelo autor.

### 3.1 Aquisição de dados

Para realizar a análise dos efeitos do espraiamento urbano na RMF, em um recorte temporal que abrange mais de cinquenta anos, foi indispensável a construção de uma base de dados abrangente e detalhada. A obtenção desses dados apresentou diversos desafios, particularmente devido à complexidade e dispersão das informações ao longo do período estudado, em diversas fontes.

No que diz respeito às informações populacionais, a coleta de dados foi relativamente facilitada pelo acervo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), que mantém séries históricas consistentes dos censos demográficos. Em especial, os censos anteriores ao ano 2000 foram bem documentados, embora o acesso a esses dados em nível de setores censitários fosse restrito e exigisse solicitações formais. A partir do Censo de 2000, no entanto, houve uma mudança significativa, com a disponibilização gratuita e online dos microdados em nível de setores censitários, o que permitiu uma identificação mais precisa e ágil da distribuição populacional em diferentes áreas dos municípios, facilitando a análise geoespacial.

Enquanto isso dados da mancha urbana se provaram os de maior difícil acesso, tendo em vista que os dados sobre a expansão da mancha urbana não são centralizados em uma única fonte pública de fácil acesso. Para a análise histórica da expansão urbana, foi necessário

recorrer a diversas fontes complementares, como mapas históricos, imagens de satélite e estudos acadêmicos. A principal dificuldade encontrada foi a ausência de um levantamento sistemático contínuo que cobrisse o período completo. Grande parte dos dados estava fragmentada entre órgãos municipais e estaduais.

Imagens de satélite, fornecidas por plataformas como o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), foram essenciais para mapear as mudanças na mancha urbana, especialmente nos municípios além de Fortaleza. Na capital, o Instituto de Pesquisa e Planejamento de Fortaleza (IPPLAN) já possui esses dados catalogados e padronizados, facilitando a realização de estudos. No entanto, nas prefeituras menores da RMF, esses dados são praticamente inexistentes, dificultando o desenvolvimento de análises semelhantes.

E por último, a aquisição dos dados referentes às unidades geradoras de transportes de carga foi um processo que demandou um esforço significativo, uma vez que envolveu diversas etapas para obter e padronizar as informações. Inicialmente, foi necessário identificar as principais fontes de dados, sendo utilizada uma base cedida pela SEBRAE, de cadastros de empresas, no período de estudo. Porém por se tratar de uma série histórica, ela essas informações não geoespacializadas. Então foi um trabalho de padronização necessário introduzir a variável espacial nessa base, que se deu em três etapas.

Primeiramente essas informações foram alimentadas em um banco de dados relacional, utilizando-se o software open-source Postgresql, que permitiu unificar as diferentes tabelas, em sequência com as informações padronizadas, foi necessário, através das informações de endereço, contidas no cadastro das empresas, descobrir a posição geográfica referente a elas, e essa etapa foi feita a partir da técnica de geocodificação, utilizando APIs de serviços de mapas, como o Google Maps e Nominatim, para converter os endereços em coordenadas geográficas (latitude e longitude). Essa etapa foi realizada utilizando a extensão 'Geocode by Awesome Table' no Google Sheets, o que facilitou a obtenção das coordenadas geográficas de forma eficiente.

Após essa fase, os dados foram reintegrados ao banco de dados relacional e manipulados com o auxílio da extensão PostGIS, uma ferramenta espacial integrada ao PostgreSQL, para gerenciar e analisar os dados geoespaciais. Para garantir a precisão da geocodificação, aplicamos filtros rigorosos, removendo endereços que não puderam ser localizados e utilizando filtros de interseção espacial para eliminar aqueles que estavam fora da área da Região Metropolitana de Fortaleza, evitando assim erros na atribuição das coordenadas.

Nessa etapa de limpeza e validação dos dados, conseguimos manter mais de 95% das informações iniciais, assegurando um alto nível de confiança nos dados georreferenciados e permitindo a continuação das análises logísticas e espaciais com segurança e precisão.

### **3.2 Geração dos produtos Manchas Urbanas**

Para a geração das manchas urbanas, foi empregada a técnica de sensoriamento remoto utilizando imagens de satélite, com o objetivo de identificar e classificar o uso e ocupação do solo ao longo do período estudado. O processo de classificação seguiu uma abordagem sistemática, dividida por décadas, e utilizou diferentes tecnologias de sensoriamento remoto conforme a disponibilidade de imagens e os avanços tecnológicos ao longo do tempo. Em todas as décadas, desde 1980 até 2020, o processamento das imagens foi realizado no Google Earth Engine, que aplicou algoritmos nativos, como o Simple composite, para remover nuvens. Esse algoritmo seleciona um subconjunto das cenas menos nubladas em cada local, converte-as para reflectância TOA (Top of Atmosphere) e usa a mediana dos pixels menos nublados. Essa abordagem garantiu a criação de composições consistentes e sem interferências atmosféricas, permitindo uma análise precisa da expansão urbana na RMF.

Década de 1970: Imagens capturadas pelo satélite Landsat 3, o qual fornece dados em um número limitado de bandas espectrais, resolução espacial e temporal bem inferiores as demais missões, fazendo com que capturas na região de estudo fossem extremamente poucas, e de qualidade inutilizável, visto a grande presença de nuvens.

Décadas de 1980 a 2000: As imagens foram obtidas a partir do satélite Landsat 5, que oferece uma maior quantidade de bandas espectrais e resolução espacial adequada para identificar variações mais sutis no uso do solo. As bandas infravermelho próximo (NIR) e vermelho visível foram especialmente úteis para diferenciar áreas urbanas de vegetação e corpos d'água, permitindo a delimitação da expansão urbana inicial na RMF.

Além das informações já contidas nas imagens disponibilizadas, utilizou-se diversos indicies para melhor diferenciar as áreas similares para o sensor, no caso, as áreas urbanizadas e as de solo exposto, principalmente associadas a uso de agricultura. Para isso os indicies:

NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) Índice de Diferença Normalizada da Vegetação. O NDVI utiliza principalmente as bandas do vermelho (R) e do infravermelho próximo (NIR) para calcular a presença e a saúde da vegetação. Este índice foi introduzido por Rouse et al. (1974).

$$NDVI = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R)}$$

NDBI (*Normalized Density Building Index*). Índice de Diferença Normalizada de Áreas Construídas. O NDBI utiliza as bandas do infravermelho próximo (NIR) e do infravermelho de ondas curtas (SWIR). Foi proposto por Zha et al. (2003).

$$NDBI = \frac{(SWIR + NIR)}{(SWIR - NIR)}$$

NDBaI (*Normalized Difference Bare Soil Index*). Índice de Diferença Normalizada do Solo Exposto. O NDBaI combina as bandas do infravermelho de ondas curtas (SWIR), infravermelho próximo (NIR), vermelho (R) e azul (B) para detectar a presença de solo exposto. Proposto por (Zhao e Chen, 2005).

$$NDBaI = \frac{(SWIR + R) + (NIR + B)}{(SWIR + R) + (NIR + B)}$$

A partir de técnicas de classificação supervisionada, utilizando o algoritmo de aprendizado de máquina Random Forest, foi possível identificar com maior precisão as áreas urbanizadas, zonas de expansão e as mudanças nas áreas periurbanas, associadas ao espraiamento urbano. Desenvolvido por Leo Breiman (2001), o Random Forest combina a robustez de múltiplas árvores de decisão, proporcionando previsões consistentes e acuradas ao integrar uma diversidade de variáveis multiespectrais captadas pelos satélites Landsat 5 e 8. Este método se mostrou extremamente eficaz, especialmente na identificação de padrões de uso do solo em áreas heterogêneas, permitindo a detecção de mudanças sutis nas áreas construídas e periurbanas, muitas vezes associadas ao espraiamento logístico e urbano.

Décadas de 2010 a 2020:

Para os períodos mais recentes, foram utilizadas imagens do satélite Landsat 8, que oferece uma resolução espectral aprimorada em relação ao Landsat 5, com maior sensibilidade nas bandas termais e infravermelhas de ondas curtas (SWIR). Isso melhorou significativamente a precisão na identificação das áreas urbanizadas, vegetação e corpos d'água, além de auxiliar na diferenciação entre áreas de solo exposto e zonas recém-urbanizadas. O uso dessas imagens permitiu o mapeamento detalhado da urbanização mais

recente na RMF, evidenciando tanto a dispersão das atividades logísticas quanto o crescimento das áreas residenciais nas franjas metropolitanas.

O processo de análise seguiu com a aplicação de uma técnica de classificação supervisionada, que envolve a escolha de amostras representativas de áreas com uso do solo conhecido, como áreas urbanas, vegetação e corpos d'água, para treinamento do algoritmo. Através das bandas espectrais coletadas pelos sensores do Landsat 8, o Random Forest processou esses dados e identificou padrões consistentes com as classes previamente definidas, resultando na criação de mapas detalhados da mancha urbana. Esse método permitiu capturar a expansão urbana e logística ao longo do tempo, especialmente nas zonas periurbanas, onde o fenômeno do espraiamento é mais evidente.

Para a escolha dos pontos de amostra, foi adotada uma estratégia híbrida, combinando pontos aleatórios com pontos selecionados de áreas que apresentavam maior dificuldade de classificação, como divisas entre regiões de diferentes classificações (ex. áreas urbanas e solo exposto, água e vegetação). Essa abordagem permitiu refinar a análise em áreas de transição, onde os limites entre diferentes tipos de uso do solo tendem a ser menos claros. Além disso, para garantir a consistência entre os resultados ao longo dos anos analisados, as amostras de treinamento foram mantidas constantes em todo o período de observação. Isso permitiu a reutilização dos mesmos pontos de treinamento, garantindo que as comparações temporais fossem realizadas de maneira robusta e coerente.

Ao combinar essas técnicas avançadas de sensoriamento remoto e classificação supervisionada, obteve-se uma precisão elevada nos resultados, permitindo mapear de forma detalhada as transformações espaciais associadas ao espraiamento urbano na RMF. Essas técnicas, ao processarem dados espectrais de forma robusta, possibilitaram não apenas identificar a expansão urbana, mas também rastrear mudanças significativas nas infraestruturas logísticas, que desempenham um papel crucial na dispersão das atividades ao longo do território.

### **3.3 Geração dos produtos Isócronas**

Para visualizar espacialmente o tempo médio de viagem dos geradores de carga, utilizamos as linhas isócronas, que delimitam zonas contendo pontos acessíveis dentro do mesmo intervalo de tempo. No contexto deste estudo, esses geradores correspondem a varejistas e atacadistas de alimentos. A construção das isócronas baseia-se no conceito de crono-urbanismo, que relaciona o planejamento urbano ao tempo de deslocamento. O

conceito de Cidade de 15 Minutos, proposto por Moreno et al. (2021), enfatiza a necessidade de reorganizar o espaço urbano para que as pessoas possam acessar os principais serviços e atividades em até 15 minutos a pé ou de bicicleta. Embora esse modelo seja amplamente aplicado ao planejamento urbano focado em pedestres, ele também oferece uma base teórica relevante para a distribuição de cargas e a eficiência logística, pois o tempo de deslocamento impacta diretamente as emissões veiculares e a qualidade ambiental urbana.

Estudos como os de Dablanc e Rakotonarivo (2010) demonstram que o tempo médio de deslocamento está diretamente relacionado à quantidade de emissões geradas, sendo esse fator ainda mais relevante no caso de poluentes associados à queima de diesel, como material particulado (MP) e óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), conforme indicado no Inventário Nacional de Emissões de Gases de Efeito Estufa (MCTI, 2022). Esses poluentes, classificados como locais, impactam diretamente a qualidade do ar em áreas de intenso tráfego rodoviário. De acordo com Carvalho (2011), os poluentes locais são aqueles cujos efeitos se concentram na área de emissão, acumulando-se no ambiente urbano e contribuindo para a degradação da qualidade do ar e riscos à saúde pública.

### 3.3.1 Modelagem das Isócronas

A geração das zonas de tempo de viagem, representadas pelas isócronas, foi realizada a partir das coordenadas dos pontos geradores de transporte de carga, obtidas previamente por meio da geocodificação das empresas atacadistas e centros de distribuição. Essas coordenadas foram inseridas em um Sistema de Informação Geográfica (SIG) como pontos de origem para o cálculo das distâncias e dos tempos de viagem.

Para garantir precisão nos cálculos das isócronas, utilizamos dados de malha viária do OpenStreetMap (OSM), uma plataforma de mapeamento colaborativo amplamente reconhecida e utilizada em estudos de transporte e planejamento urbano. Contudo, foi necessário aplicar filtros específicos para garantir que apenas as vias adequadas ao transporte de cargas fossem consideradas. Esse processo envolveu a exclusão de vias inadequadas para caminhões, como caminhos estreitos, vias de pedestres, ruas internas de loteamentos e condomínios, bem como ruas sem infraestrutura adequada para veículos de grande porte.

A filtragem foi realizada com base na classificação viária disponível no OSM, o que permitiu incluir apenas logradouros viáveis para o tráfego de transporte de carga nos cálculos. Isso garantiu que as isócronas refletissem rotas acessíveis e realistas para caminhões, evitando distorções que poderiam ocorrer caso trechos inapropriados fossem incluídos no modelo.

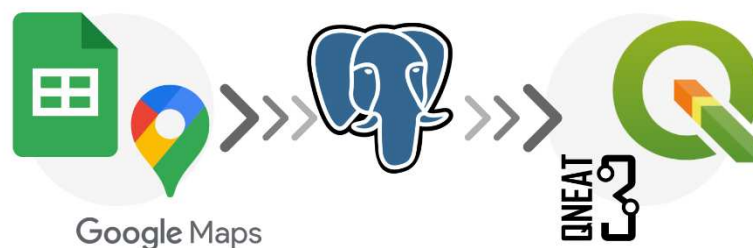
Com a base viária filtrada e as coordenadas dos pontos geradores de carga, utilizamos o software SIG QGIS e a extensão QNEAT3 (QGIS Network Analysis Toolbox 3) para calcular as distâncias e tempos de viagem. A ferramenta permitiu gerar as isócronas, ou zonas de tempo, representando áreas que podem ser cobertas em intervalos de 15, 30, 45, e 60 minutos, considerando uma velocidade média de 35 km/h em condições urbanas, com base em valores adotados em estudos prévios, considerando limitações de vias e trânsito.

A criação das isócronas através do QNEAT3 envolve três etapas principais. A primeira consiste na geração de uma nuvem de pontos a partir da localização dos pontos da tabela original. Para cada ponto de origem, novos pontos são adicionados ao longo da malha viária, com um valor de custo associado a cada um deles, representando o tempo de deslocamento (em segundos) para se chegar a esses pontos a partir do ponto de origem.

Após a criação da nuvem de pontos, aplica-se o método de interpolação utilizando a triangulação de Delaunay (TIN - Triangulated Irregular Network). Esse processo cria uma malha irregular triangulada que conecta os pontos gerados, permitindo estimar valores contínuos de tempo de viagem para toda a área analisada, mesmo nas regiões entre os pontos conhecidos.

Por fim, esses valores contínuos são convertidos em curvas através da extração de contornos da camada matricial, resultando em isócronas que delimitam as áreas acessíveis dentro de intervalos de tempo específicos a partir do ponto de origem.

Figura 2 – Ordem do processo de criação das isócronas



Fonte: elaborada pelo autor.

### 3.4 Aquisição de Dados de Estimativa de PM2.5

Para a aquisição de dados quantitativos de emissões associadas ao transporte de carga, foram utilizados os dados de concentração de Material Particulado Fino (PM2.5)

provenientes do banco de dados V6.GL.02 do Atmospheric Composition Analysis Group (ACAG), disponibilizado pela Washington University.

Esses dados foram gerados a partir da integração de múltiplas fontes de observação, combinando medições de sensores satelitais, incluindo MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), MISR (Multi-angle Imaging SpectroRadiometer), SeaWiFS (Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor) e VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite), com modelagem atmosférica baseada no modelo de transporte químico GEOS-Chem, conforme metodologia descrita por Zeng et al. (2024).

A escolha do PM<sub>2.5</sub> como métrica para esta análise deve-se à sua relevância como indicador da poluição atmosférica gerada pelo transporte de carga, especialmente em áreas urbanas com intenso tráfego rodoviário. Diferente de poluentes como dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>) e monóxido de carbono (CO), que podem ser medidos diretamente por sensores satelitais, as concentrações de PM<sub>2.5</sub> não são detectadas de forma direta a partir de imagens de satélite. Em vez disso, sua estimativa requer um processamento mais avançado, que integra dados de profundidade óptica de aerossóis (AOD) fornecidos pelos sensores mencionados, modelagem química de transporte atmosférico e calibração com medições terrestres. Esse método permite uma estimativa mais precisa da dispersão e concentração do poluente, garantindo a confiabilidade dos resultados.

Outro fator determinante para a escolha do PM<sub>2.5</sub> foi a disponibilidade de dados amplamente validados e utilizados na comunidade científica. Os conjuntos de dados produzidos pelo ACAG, com base em metodologias avançadas desenvolvidas por Zeng et al. (2024), passaram por rigorosos processos de calibração e validação, sendo amplamente aplicados em estudos de qualidade do ar e impactos ambientais. A utilização de dados já processados e refinados reduz significativamente as incertezas associadas às estimativas de poluição, eliminando a necessidade de modelagem independente e garantindo robustez e comparabilidade dos resultados. Além disso, a consistência temporal desses dados possibilita a realização de análises de tendência confiáveis, tornando o PM<sub>2.5</sub> um parâmetro ideal para avaliar a evolução das emissões associadas ao transporte de carga na RMF.

Para este estudo, foram utilizados dados de médias anuais de PM<sub>2.5</sub>, sendo escolhidos os anos de 2007, 2012 e 2022. A seleção dessas datas foi baseada na disponibilidade e na resolução espacial dos dados, que, embora cubram o período de 1998 a 2022, apresentam variações significativas na precisão espacial ao longo dos anos. Nos anos iniciais da série, a resolução espacial das estimativas era inferior, comprometendo a exatidão das análises em escalas menores. Somente em anos mais recentes, a resolução espacial passou a ser 0,01 grau (~1 km<sup>2</sup>), permitindo uma análise mais detalhada da distribuição do poluente na RMF, compatível com os demais produtos utilizados na pesquisa.

Os dados foram adquiridos no formato NetCDF (Network Common Data Form) e convertidos para GeoTIFF, facilitando sua manipulação e análise espacial. O processamento foi realizado no software QGIS, onde a ferramenta de contornos foi utilizada para extrair e visualizar as zonas de maior concentração do poluente. Essa abordagem permitiu identificar

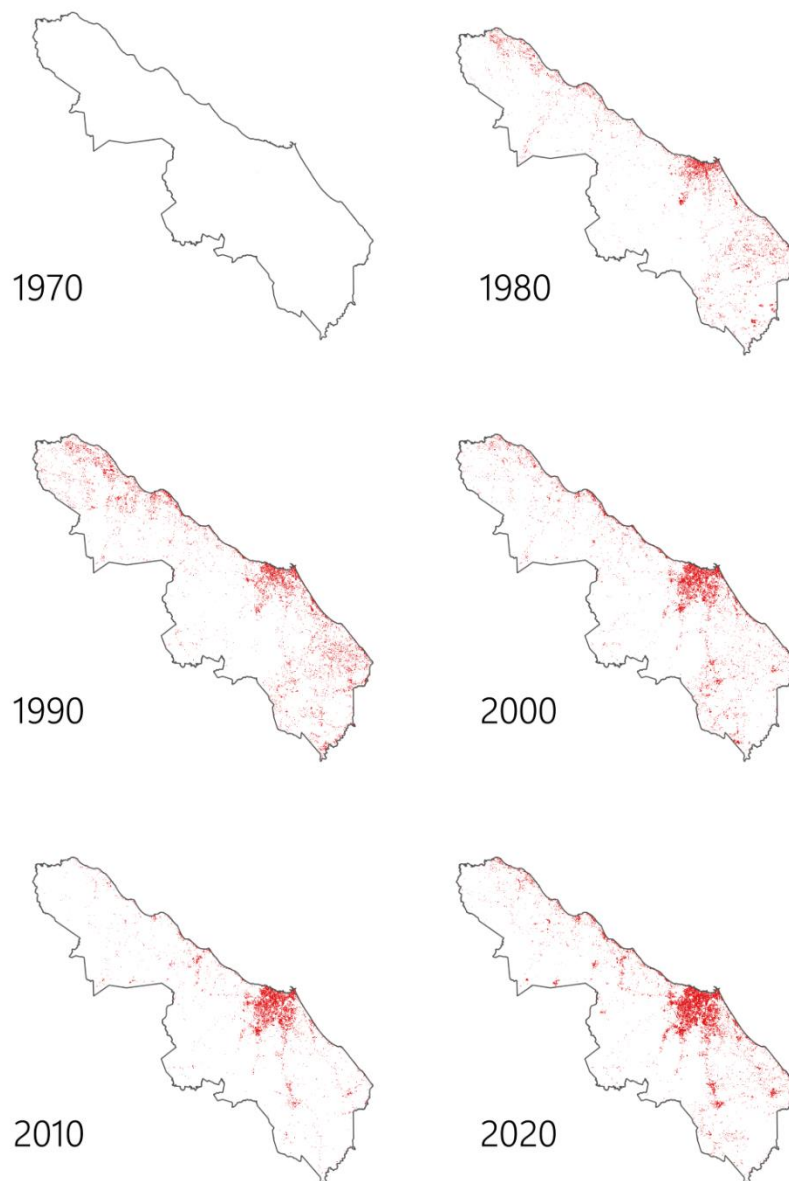
especialmente as áreas mais impactadas e correlacioná-las ao espraiamento logístico, fornecendo subsídios para a avaliação dos impactos das emissões atmosféricas na região.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Expansão da Mancha Urbana e Espraiamento

A análise das manchas urbanas da RMF revela uma expansão significativa da área urbanizada ao longo das últimas cinco décadas, impulsionada pelo crescimento populacional e pelo espraiamento urbano e logístico. As figuras abaixo mostram a evolução das manchas urbanas de 1980 a 2020, visto a impossibilidade de gerar os resultados devido à falta de informação de dados de satélite em 1970.

Mapa 2 – Evolução das manchas urbanas na RMF entre 1970 e 2020



Fonte: elaborada pelo autor.

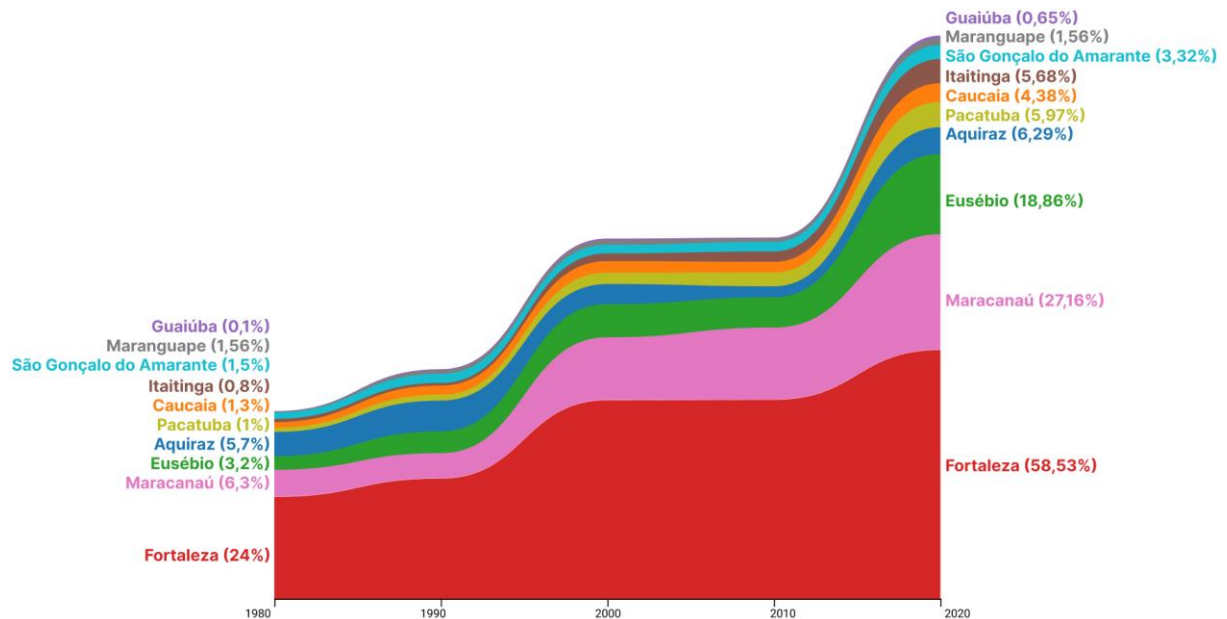
Conforme ilustrado na figura 1, nas últimas décadas, a expansão urbana tem seguido um padrão concentrado ao redor da capital, com uma notável expansão em direção ao sul e sudeste, especialmente nas áreas de Maracanaú e Eusébio. Esse movimento reflete tanto a dinâmica de urbanização da metrópole quanto a realocação de atividades logísticas e industriais, características do fenômeno do espraiamento logístico. Este crescimento ocorre de maneira desigual, com algumas áreas apresentando maior densidade populacional e infraestrutura em comparação a outras.

Fortaleza experimentou uma expansão significativa de sua área urbanizada, passando de 24% em 1980 para 58,53% em 2020, consolidando-se como o principal centro urbano da região. Maracanaú se destaca como o segundo município com maior expansão urbana, saltando de 6,30% em 1980 para 27,16% em 2020, crescimento que reflete a importância crescente do município no setor industrial e logístico, sendo um dos principais polos de armazenagem e distribuição da RMF. Eusébio também apresenta um aumento expressivo, passando de 3,20% para 18,86% no mesmo período, com uma urbanização acelerada a partir da década de 1990, impulsionada pelo desenvolvimento de condomínios residenciais e a descentralização de atividades econômicas.

Em contrapartida municípios como Guaiuba, apresentaram crescimento mais modesto, permanecendo com um percentual reduzido de urbanização, variando de 0,10% em 1980 para apenas 0,65% em 2020. Enquanto municípios vizinhos como Pacatuba, apresentou um crescimento significativo, passando de 1% em 1980 para 5,97% em 2020, embora ainda limitada pelo seu território predominantemente rural.

Já Caucaia, Maranguape e São Gonçalo do Amarante, apesar de apresentarem crescimento urbano, tiveram sua expansão relativamente contida pela predominância de áreas rurais e limitações infraestruturais, dificultando a ocupação urbana contínua. Caucaia, por exemplo, aumentou sua área urbanizada de 1,30% para 4,38% no período analisado.

Gráfico 1 – Evolução do percentual de Área Urbanizada na RMF entre 1980-2020



Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 2 – Evolução do percentual de Area Urbanizada na RMF (1980-2020)

Município	1970	1980	1990	2000	2010	2020
<b>Fortaleza</b>	*	24.00%	28.31%	46.73%	46.84%	58.53%
<b>Maracanaú</b>	*	6.30%	5.91%	14.72%	16.91%	27.16%
<b>Eusébio</b>	*	3.20%	5.13%	7.82%	7.13%	18.86%
<b>Aquiraz</b>	*	5.70%	7.22%	4.71%	2.56%	6.29%
<b>Pacatuba</b>	*	1.00%	1.38%	2.67%	3.27%	5.97%
<b>Itaitinga</b>	*	0.80%	0.61%	1.81%	2.44%	5.68%
<b>Caucaia</b>	*	1.30%	2.15%	2.72%	2.49%	4.38%
<b>São Gonçalo do Amarante</b>	*	1.50%	2.16%	2.04%	2.22%	3.32%
<b>Maranguape</b>	*	0.20%	0.87%	1.10%	0.78%	1.56%
<b>Guaiúba</b>	*	0.10%	0.22%	0.36%	0.27%	0.65%

Fonte: Autor

Nota: \* Sem informação

#### 4.2 Localização dos Geradores de carga

A análise das localizações das empresas classificadas como grandes geradoras de transporte de cargas na RMF revela um processo contínuo de dispersão ao longo das décadas, caracterizando o fenômeno do espriamento logístico (logistics sprawl). Esse processo se

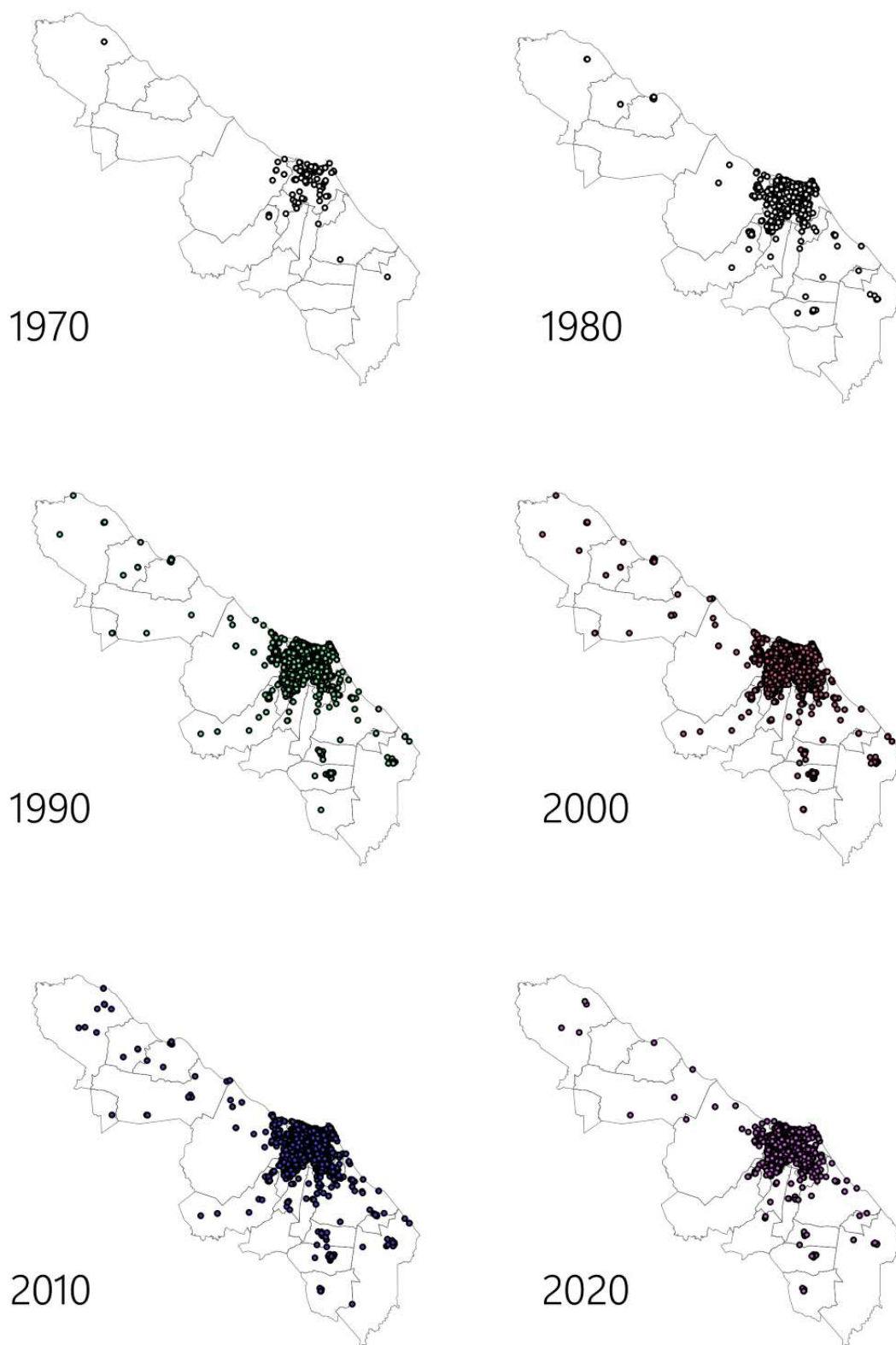
assemelha ao observado por Dablanc e Rakotonarivo (2010) em Paris, onde a descentralização das infraestruturas logísticas para áreas periféricas resultou em maior tempo de transporte, aumento das emissões.

Inicialmente, em 1970, a maior parte dessas empresas estava concentrada na região central de Fortaleza, com 103 atacadistas de alimentos registrados, refletindo a importância do núcleo urbano na organização econômica e logística da época. Contudo, nas décadas seguintes, a partir de 1980, impulsionado pelo crescimento urbano e pelo desenvolvimento de novas áreas industriais e comerciais, observou-se uma expansão significativa dessas atividades para as periferias da cidade e, em menor escala, nos centros urbanos dos municípios adjacentes. Cidades como Maracanaú passaram a contar com 100 empresas, enquanto Caucaia registrava aproximadamente 60 atacadistas, demonstrando um crescimento expressivo, porém ainda distante da concentração observada na capital, onde o número de empresas saltou para 718.

A tendência de dispersão se intensificou durante as décadas de 1990 e 2000, com Fortaleza atingindo 2.216 e 2.874 empresas, respectivamente, enquanto Maracanaú e Caucaia consolidavam-se como polos logísticos, chegando a 431 e 209 empresas em 2000. Esse movimento reflete um padrão observado em diversas metrópoles, onde custos mais baixos de solo, melhorias na infraestrutura rodoviária e incentivos fiscais favoreceram a descentralização logística. Paralelamente, municípios como Eusébio passaram a atrair um número crescente de empresas, atingindo 54 atacadistas de alimentos em 2000, evidenciando um processo de dispersão espacial da logística urbana.

Contudo, os dados das décadas mais recentes, de 2010 e 2020, sugerem uma reversão parcial desse movimento, indicando um cenário de reconcentração logística. Fortaleza registrou 1.920 atacadistas de alimentos em 2010 e 946 em 2020, enquanto os municípios periféricos também apresentaram um leve declínio. Maracanaú reduziu sua quantidade de empresas de 434 para 344 entre 2010 e 2020, e Eusébio caiu para 26 atacadistas. Esse fenômeno pode estar relacionado às mudanças na demanda logística urbana.

Mapa 3 – Evolução das localizações de atacados de alimentos na RMF entre 1970 e 2020



Fonte: elaborado pelo autor.

A evolução do número de empresas de atacado de alimentos nos municípios da RMF revela padrões distintos de crescimento e retração ao longo das décadas. A maioria dos municípios registrou um aumento contínuo até 2000, quando o setor atingiu seu pico de atividade econômica e logística. Contudo, a partir de 2000, observa-se um declínio generalizado, intensificado em 2020, possivelmente devido a fatores econômicos, mudanças nas políticas de planejamento urbano e reorganização das cadeias de distribuição. Além disso, a redução nos dados absolutos pode ser influenciada pelo fato de a década de 2020 ainda estar em andamento, refletindo um menor intervalo temporal de observação.

Entre os municípios analisados, Maracanaú e Caucaia se destacam por suas trajetórias distintas. Maracanaú consolidou-se como um dos principais polos logísticos da região, impulsionado por infraestrutura favorável e incentivos econômicos, enquanto Caucaia, apesar de um crescimento expressivo até 2010, apresentou uma desaceleração posterior. Essa diferença pode estar relacionada a fatores como acessibilidade a rodovias e políticas locais de incentivo ao setor.

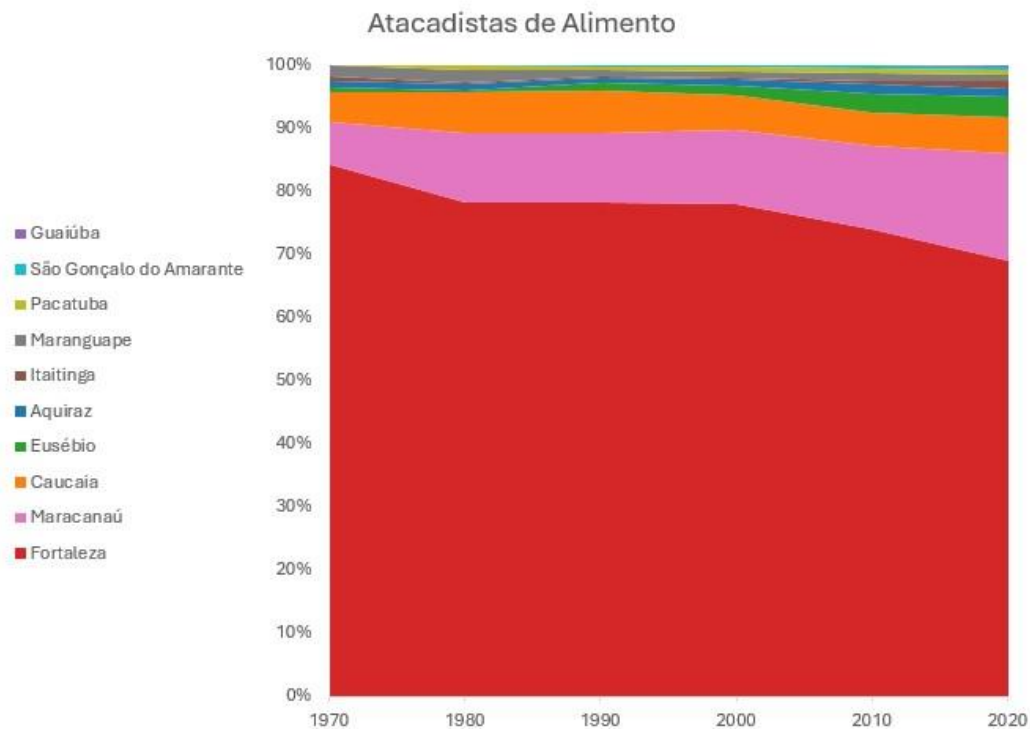
Além disso, municípios como Eusébio e São Gonçalo do Amarante também apresentaram crescimento no número de empresas atacadistas, embora em um ritmo mais moderado. Isso sugere que, apesar da descentralização observada no setor, algumas áreas ainda mantêm uma menor concentração de empresas, refletindo um processo seletivo de distribuição das atividades logísticas.

Gráfico 2 – Evolução da quantidade de atacadistas de alimentos na RMF entre 1970 e 2020



Fonte: elaborado pelo autor.

Gráfico 3 – Evolução proporcional da quantidade de atacadistas de alimentos nos municípios originais da RMF entre 1970 e 2020

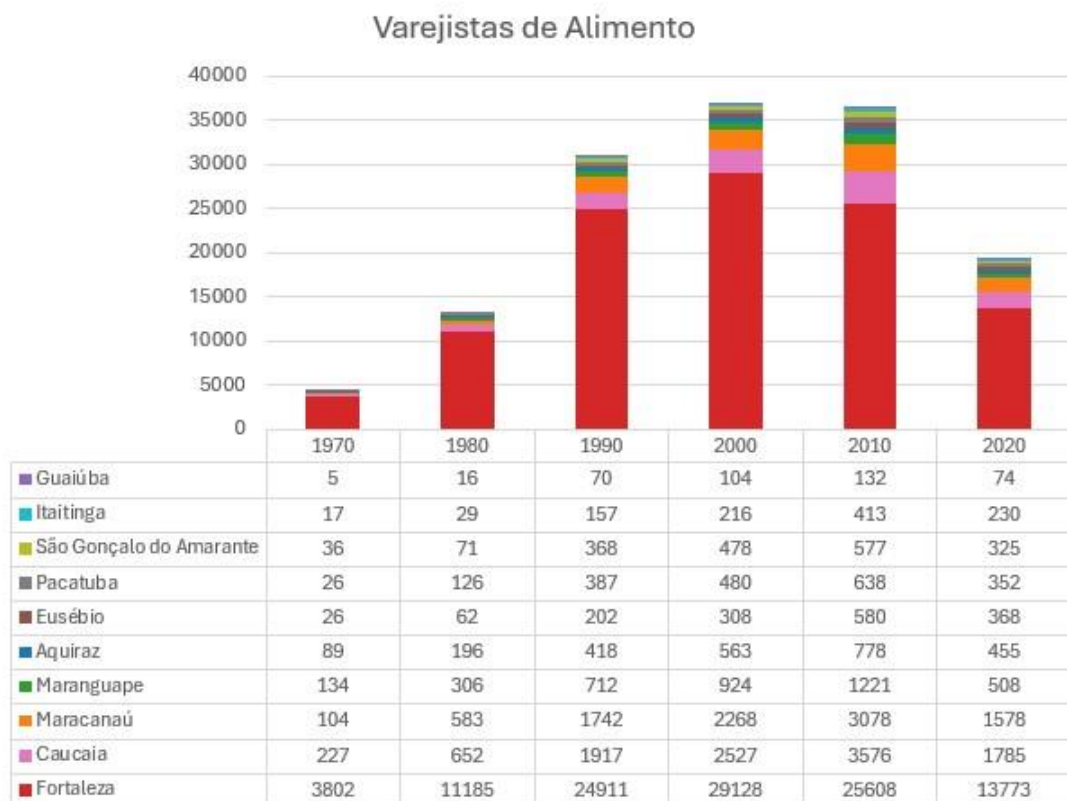


Fonte: elaborado pelo autor.

O gráfico 3 revela uma informação que pode não ser evidente ao observar apenas os números absolutos. A análise proporcional demonstra que os municípios além da capital apresentaram um crescimento mais consistente, resultando na redução da participação de Fortaleza no total de empresas da RMF. Essa transformação indica uma redistribuição do setor atacadista para outros municípios metropolitanos.

A partir da década de 1980, municípios como Maracanaú e Caucaia emergiram como polos logísticos alternativos. Maracanaú se destaca por sua localização estratégica, proximidade a rodovias e incentivos econômicos voltados para a indústria e distribuição. Caucaia também registrou crescimento, mas de maneira mais moderada, sugerindo que a redistribuição das empresas atacadistas ocorre de forma seletiva, dependendo de fatores como infraestrutura e políticas de incentivo.

Gráfico 4 – Evolução da quantidade de varejo de alimentos nos municípios originais da RMF entre 1970 e 2020



Fonte: elaborado pelo autor.

A análise do setor varejista de alimentos na RMF revela dinâmicas de crescimento e descentralização ao longo das décadas. O gráfico de barras evidencia um crescimento

expressivo no número de estabelecimentos até o ano 2000, quando se registra o pico de 29.128 empresas na região. Entretanto, a partir de 2010, observa-se uma queda acentuada, com Fortaleza sendo a mais impactada, reduzindo de 25.608 empresas em 2010 para 13.773 em 2020.

Esse declínio pode ser explicado por múltiplos fatores, entre os quais se destaca o espraiamento logístico, impulsionando a descentralização do setor. A expansão da malha urbana nos municípios periféricos da RMF, evidenciada pelo aumento significativo da área urbanizada entre 1980 e 2020, contribuiu para o fortalecimento de novos polos comerciais. Enquanto Fortaleza apresentou retração, outros municípios da RMF mantiveram crescimento até 2010, antes de registrarem quedas em 2020, como no caso de Caucaia e Maracanaú. Caucaia, por exemplo, aumentou de 652 empresas em 1980 para 3.576 em 2010, antes de cair para 1.785 em 2020. Esse padrão sugere um ciclo de expansão seguido por retração, fortemente impactado pela pandemia de 2020, que afetou tanto a oferta quanto a demanda no comércio de alimentos.

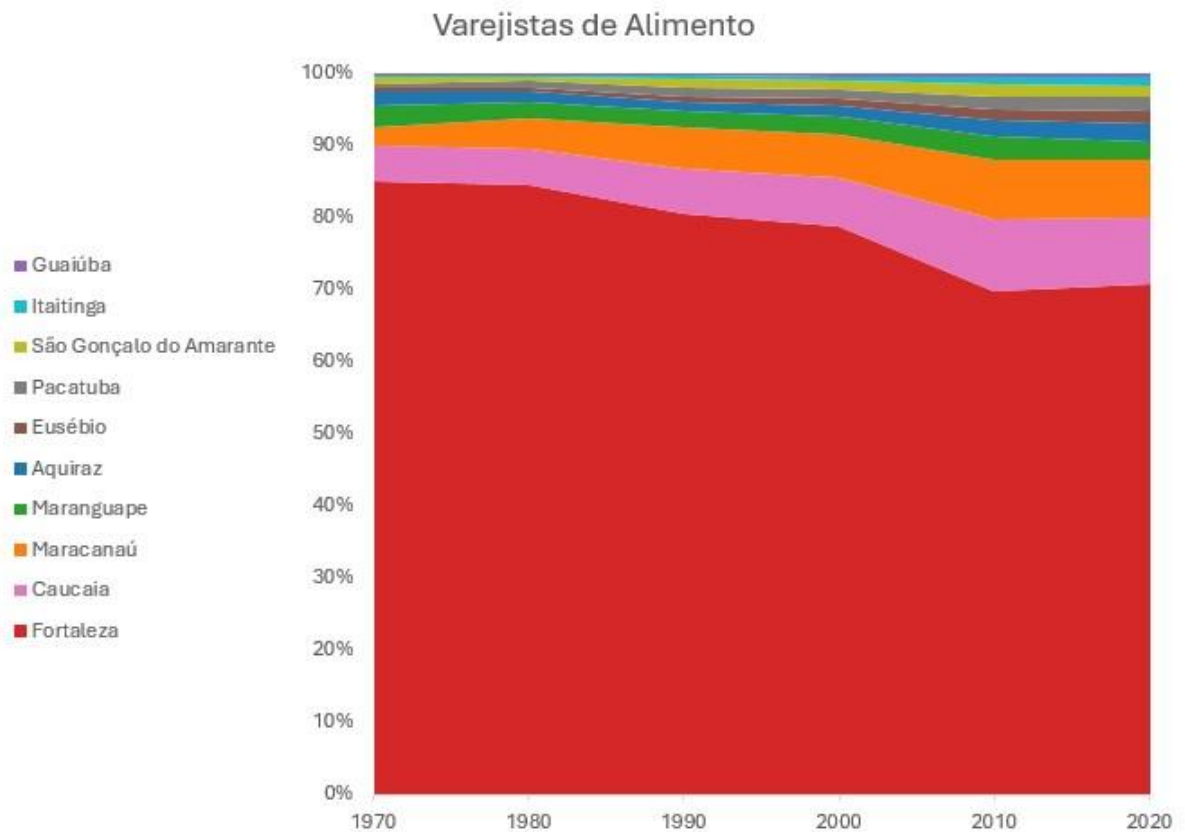
Maracanaú, um dos principais polos industriais e logísticos da região, apresentou um crescimento robusto no setor de varejo de alimentos, chegando a 3.078 empresas em 2010, antes de sofrer uma leve queda para 1578 em 2020. Em municípios menores, como Eusébio e Aquiraz, o crescimento foi mais gradual, mas ainda significativo entre 1990 e 2010. Maranguape aumentou de 712 para 1.221 estabelecimentos, enquanto Aquiraz passou de 418 para 778 e Eusébio de 202 para 580 nesse período. No entanto, assim como os demais municípios, todos registraram quedas em 2020, reduzindo para 508, 455 e 368 estabelecimentos, respectivamente. Localidades emergentes, como Pacatuba e São Gonçalo do Amarante, o crescimento também foi expressivo, com Pacatuba passando de 126 estabelecimentos em 1980 para 638 em 2010, antes de cair para 352 em 2020. São Gonçalo do Amarante teve um aumento semelhante, de 71 para 577 estabelecimentos entre 1980 e 2010, reduzindo para 325 em 2020.

De forma geral, os resultados mostram que, após a virada do milênio, Fortaleza segue uma tendência de queda, enquanto os municípios ao redor continuam a crescer até a última década, antes de também serem afetados pela crise global de 2020. Esse padrão sugere que o espraiamento das atividades comerciais e logísticas para áreas periféricas, combinado com os impactos temporários da pandemia, influenciou a distribuição das empresas de varejo de alimentos na RMF.

A análise proporcional do gráfico de área empilhada revela uma redução da participação em mais de 10% de Fortaleza no total de empresas da RMF, semelhante ao que

foi observado nos geradores de transporte, atacadistas, indicando que os municípios periféricos apresentaram um crescimento mais consistente ao longo das décadas. Essa mudança confirma o fenômeno do espriamento logístico, na distribuição das atividades comerciais.

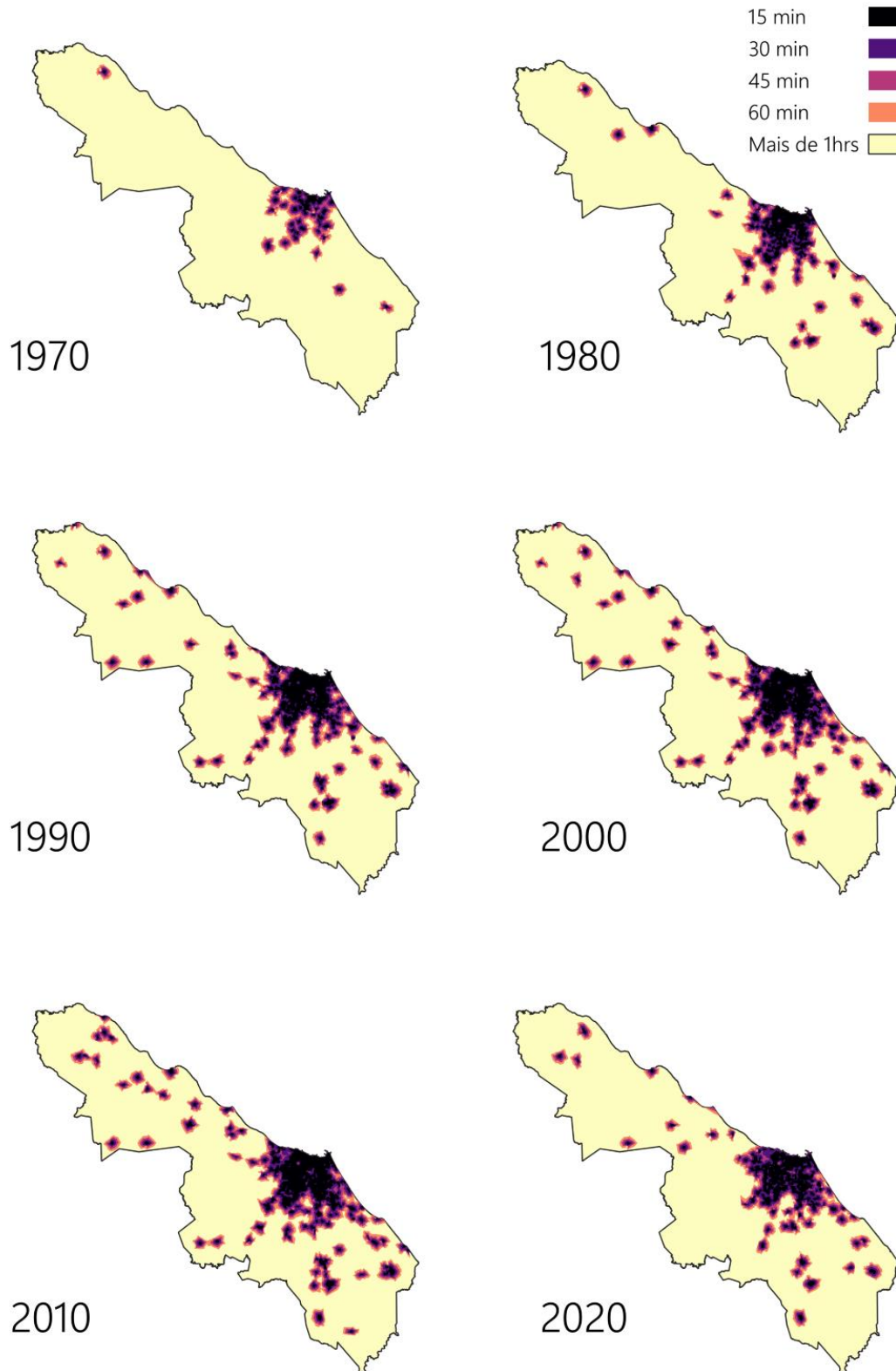
Gráfico 5 – Evolução da quantidade de varejo de alimentos nos municípios originais da RMF entre 1970 e 2020



Fonte: elaborado pelo autor.

### 4.3 Evolução do tempo de entrega

Mapa 4 - Evolução do tempo de entrega de atacado de alimento nos municípios originais da RMF entre 1970 e 2020



Fonte: elaborado pelo autor

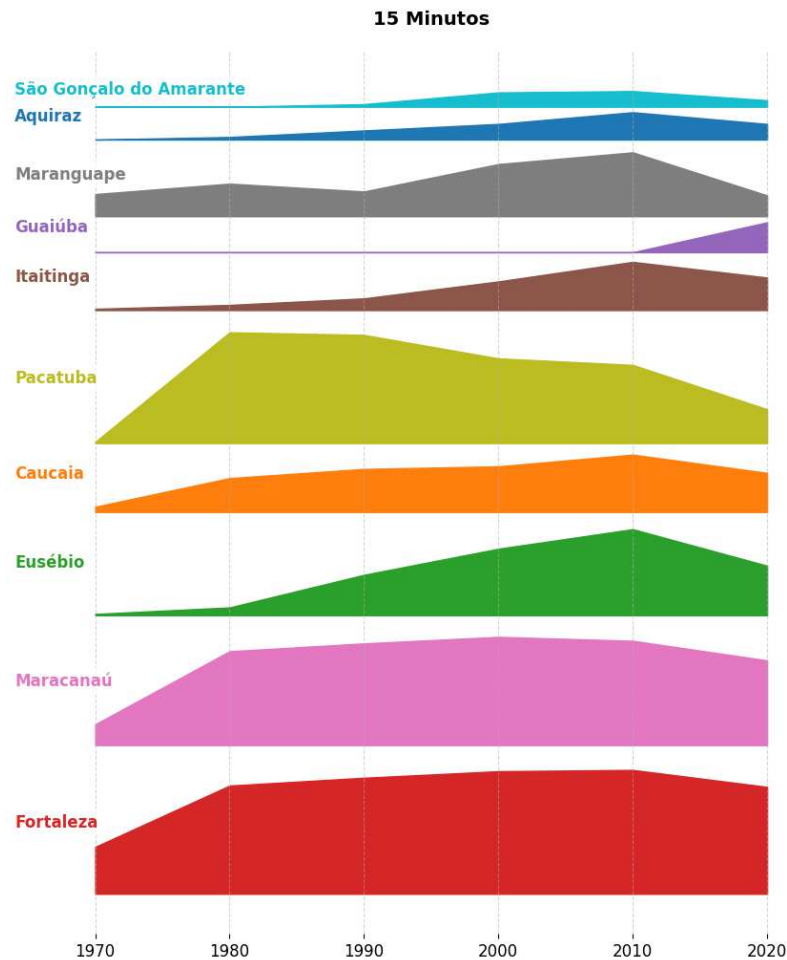
A análise dos mapas ao longo das décadas revela claramente o processo de espraiamento logístico na RMF. Em 1970, a área de maior concentração de empresas do setor alimentício estava restrita às imediações do centro de Fortaleza, com isócronas de 15 a 60 minutos, abrangendo uma área limitada. Com o passar do tempo, no entanto, é visível a expansão progressiva das atividades logísticas para áreas mais periféricas.

Na década de 1980, já é possível observar uma expansão considerável, com mais áreas sendo atendidas dentro das isócronas de 30 e 45 minutos. A partir de 1990, o espraiamento logístico se intensifica, alcançando os municípios vizinhos e cobrindo uma maior extensão territorial, acompanhando o crescimento da malha viária e a descentralização das atividades logísticas para áreas periurbanas.

Nos anos 2000, a tendência de dispersão continua, com as áreas cobertas pelas isócronas de 45 e 60 minutos se expandindo ainda mais. Mesmo com a diminuição do número de empresas observada na última década, conforme refletido nos dados, o padrão de espraiamento se manteve, resultando em uma maior área total coberta. Essa descentralização pode ser parcialmente explicada pela busca de terrenos mais baratos e melhores acessos rodoviários, como é possível ver no mapa o sentido de crescimento diretamente ligado a presença de grandes rodovias.

No período mais recente, entre 2010 e 2020, o gráfico mostra uma leve retração nas áreas cobertas dentro das isócronas de 15 e 30 minutos, especialmente em Fortaleza, o que reflete uma possível concentração de empresas em novas áreas logísticas fora do perímetro urbano denso. Essa retração pode estar relacionada a fatores como a reconfiguração das infraestruturas logísticas e o impacto das políticas urbanas e ambientais, que têm influenciado o deslocamento dessas atividades para áreas ainda mais distantes.

Assim, os mapas ilustram como o espraiamento logístico alterou significativamente a geografia das atividades de transporte de carga na RMF, com uma mudança clara do núcleo central para áreas periféricas, gerando novas dinâmicas logísticas e impactos nas emissões e no tráfego. Esse fenômeno ressalta a importância de políticas de planejamento urbano que considerem a integração eficiente entre uso do solo e transporte de cargas.



Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 3 - Evolução da Mancha urbana a 15 minutos de um atacado de alimento

<b>Município</b>	<b>1970</b>	<b>1980</b>	<b>1990</b>	<b>2000</b>	<b>2010</b>	<b>2020</b>
<b>Fortaleza</b>	36%	83%	89%	94%	95%	82%
<b>Maracanaú</b>	16%	72%	78%	83%	80%	65%
<b>Eusébio</b>	1%	6%	31%	51%	66%	38%
<b>Caucaia</b>	4%	26%	33%	35%	44%	30%
<b>Pacatuba</b>	1%	85%	83%	65%	60%	26%
<b>Itaitinga</b>	1%	4%	9%	22%	37%	25%
<b>Guaiúba</b>	0%	0%	0%	0%	0%	23%
<b>Maranguape</b>	17%	25%	19%	40%	49%	16%
<b>Aquiraz</b>	0%	2%	7%	12%	21%	12%
<b>São Gonçalo do Amarante</b>	0%	0%	2%	11%	12%	5%

Fonte: elaborado pelo autor

#### **4.4 Relação Zonas de 15 minutos / Concentração de PM 2.5**

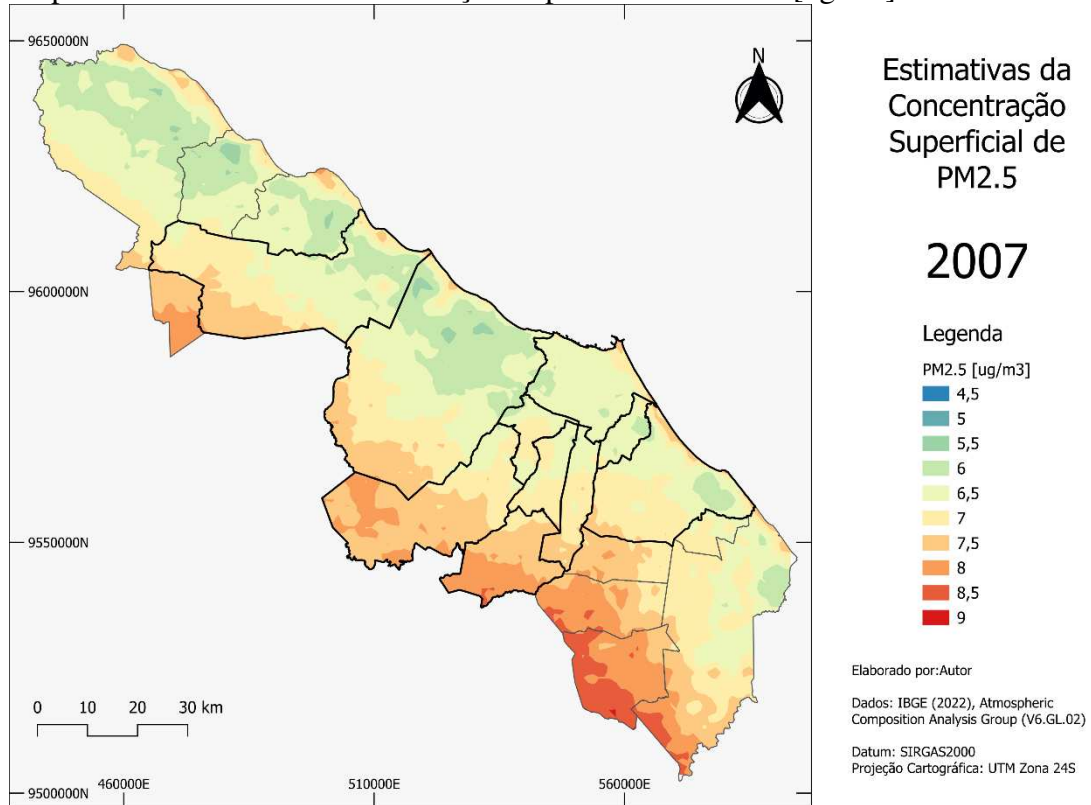
A análise das estimativas de concentração de PM<sub>2.5</sub> na RMF nos anos de 2007, 2012 e 2022 permite identificar a distribuição espacial desse poluente e sua relação com a dinâmica urbana ao longo das décadas. Esses anos foram escolhidos como indicadores das tendências das décadas correspondentes, possibilitando uma comparação entre diferentes momentos da evolução urbana e logística da região.

Os dados utilizados nesta pesquisa foram extraídos do Atmospheric Composition Analysis Group (ACAG), que fornece estimativas globais de PM<sub>2.5</sub> a partir de observações de satélite combinadas com modelagem atmosférica. Essas estimativas possuem uma resolução espacial de aproximadamente 1 km<sup>2</sup> por pixel, o que pode ser considerado uma limitação para a escala da RMF, dado que áreas menores ou variações locais podem não ser totalmente captadas. Além disso, sua precisão pode ser afetada por limitações na calibração local, uma vez que a região possui poucos sensores terrestres para validação.

Fatores naturais, como a presença de dunas e solos expostos, podem contribuir para concentrações naturalmente elevadas de partículas em suspensão, influenciando os valores estimados. Esse aspecto deve ser considerado ao interpretar os dados, uma vez que a dispersão dessas partículas ocorre independentemente das emissões veiculares ou industriais.

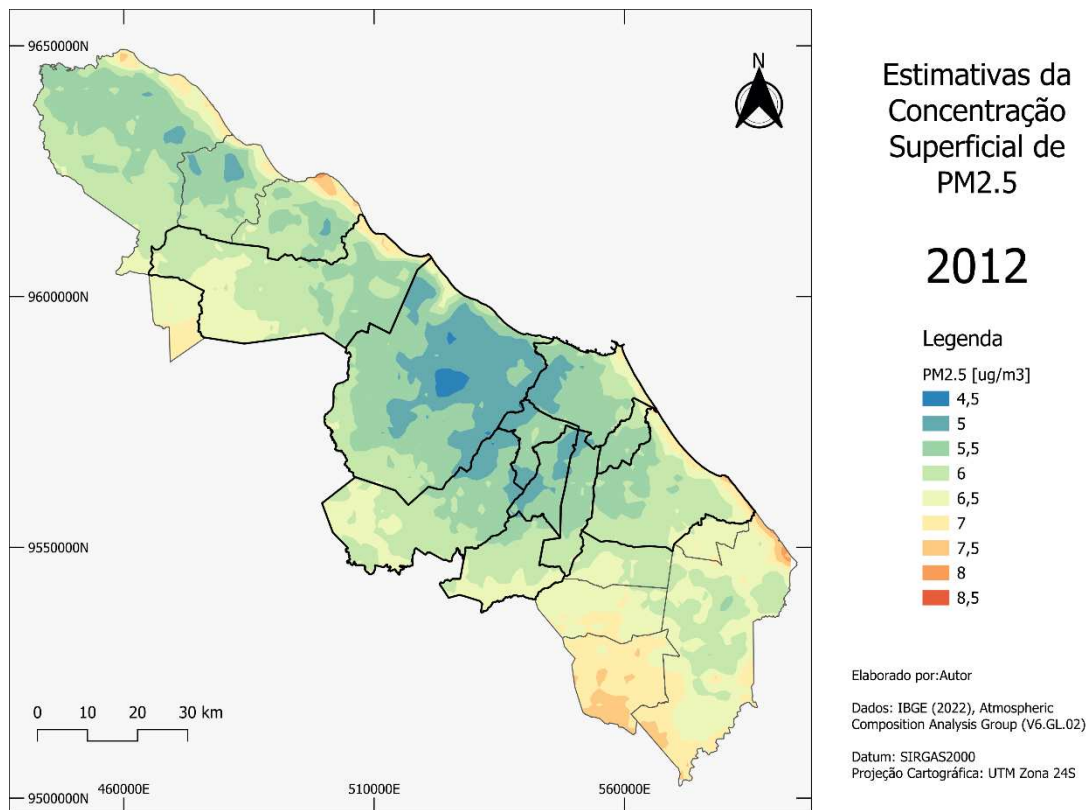
Os mapas apresentados a seguir ilustram a variação espacial das concentrações de PM<sub>2.5</sub> na RMF ao longo dos anos analisados, evidenciando a relação entre expansão urbana, distribuição logística e qualidade do ar. Essa abordagem permite identificar áreas críticas e avaliar o impacto da dispersão das atividades econômicas e da mobilidade urbana sobre a poluição atmosférica na região.

Mapa 5 - Estimativas da Concentração Superficial de PM2.5 [ug/m3] na RMF em 2007



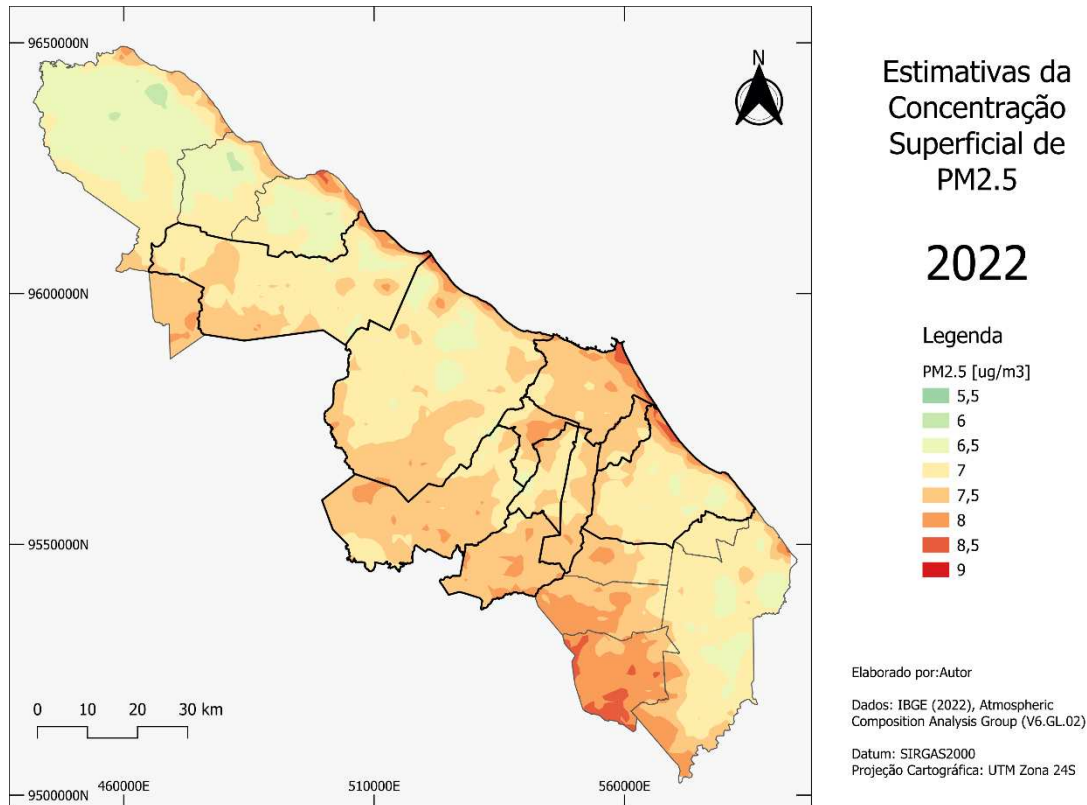
Fonte: elaborado pelo autor

Mapa 6 - Estimativas da Concentração Superficial de PM2.5 [ug/m3] na RMF em 2012



Fonte: elaborado pelo autor

Mapa 7 - Estimativas da Concentração Superficial de PM2.5 [ug/m<sup>3</sup>] na RMF em 2022



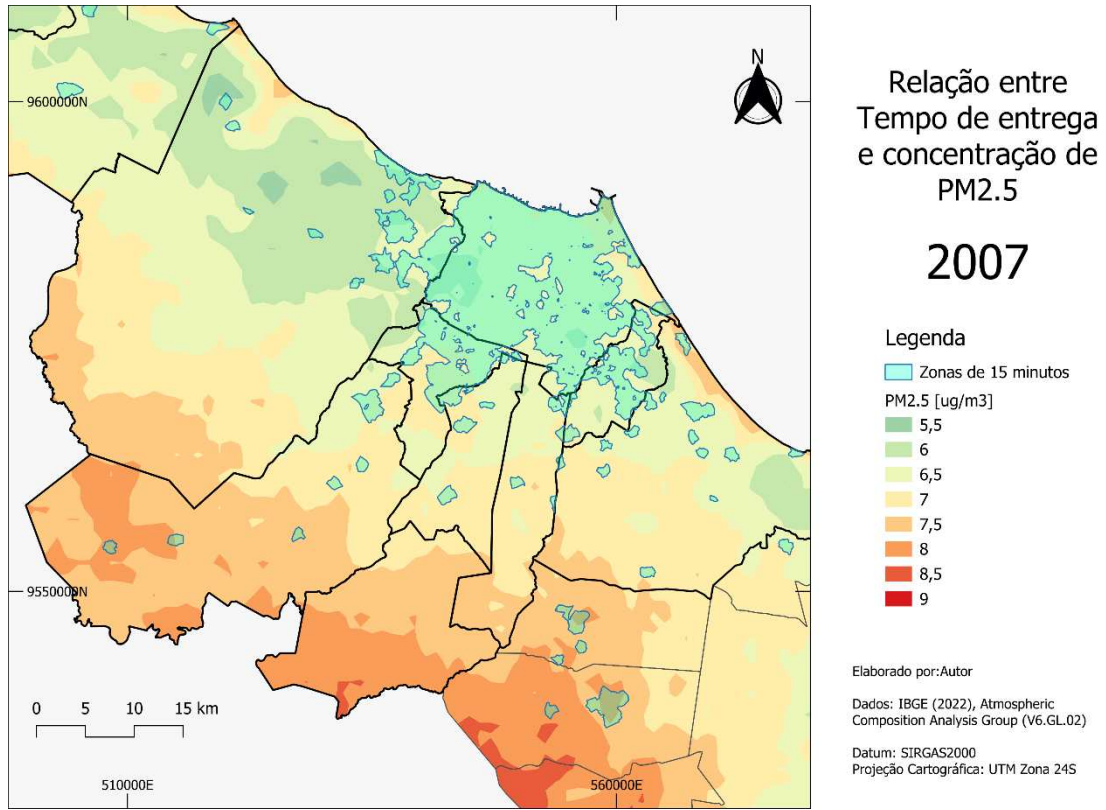
Fonte: elaborado pelo autor

Observando os mapas, é possível perceber como ocorre a concentração das médias anuais de PM2.5 na extensão da RMF, sendo evidente uma maior concentração em razão de questões naturais, especialmente em regiões de solo exposto, como a faixa de praia e os ambientes de depressão sertaneja, com destaque para municípios como Cascavel e Chorozinho.

Porém, além dessas áreas onde as concentrações são influenciadas por fatores naturais, percebe-se que as regiões mais urbanizadas apresentam níveis elevados do poluente, demonstrando a influência da mobilidade urbana e da atividade industrial. Isso é claramente observado em todo o município de Fortaleza, bem como nos centros urbanos dos demais municípios da RMF. Entre esses, destaca-se Maracanaú, onde a concentração de PM2.5 é significativamente elevada, refletindo a presença de polos industriais, áreas logísticas e intenso tráfego de veículos de carga.

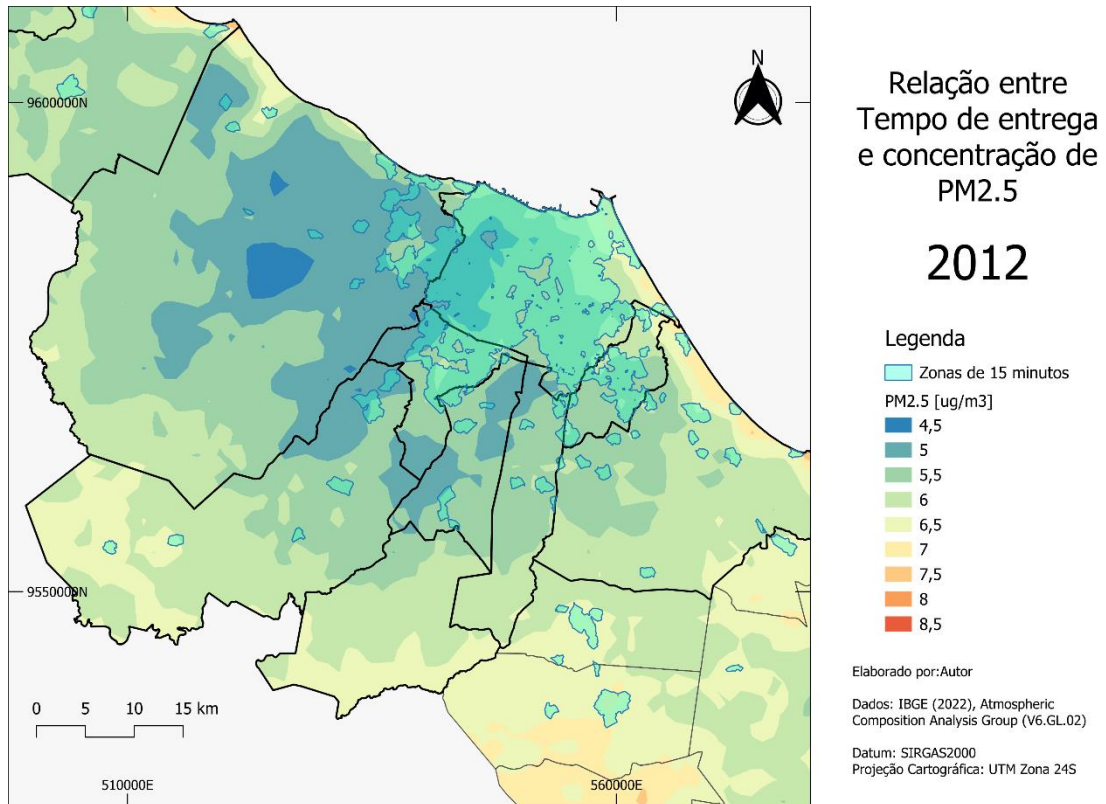
Entre os anos de 2007 e 2012, foi observada uma queda significativa na concentração de PM2.5 em grande parte da RMF, possivelmente associada a fatores meteorológicos que favoreceram a dispersão dos poluentes. No entanto, essa tendência não se manteve, e em 2022, os níveis de PM2.5 aumentaram expressivamente, ultrapassando os valores observados em 2007.

Mapa 8 - Relação Tempo de Entrega / Concentração de PM2.5 na RMF em 2007



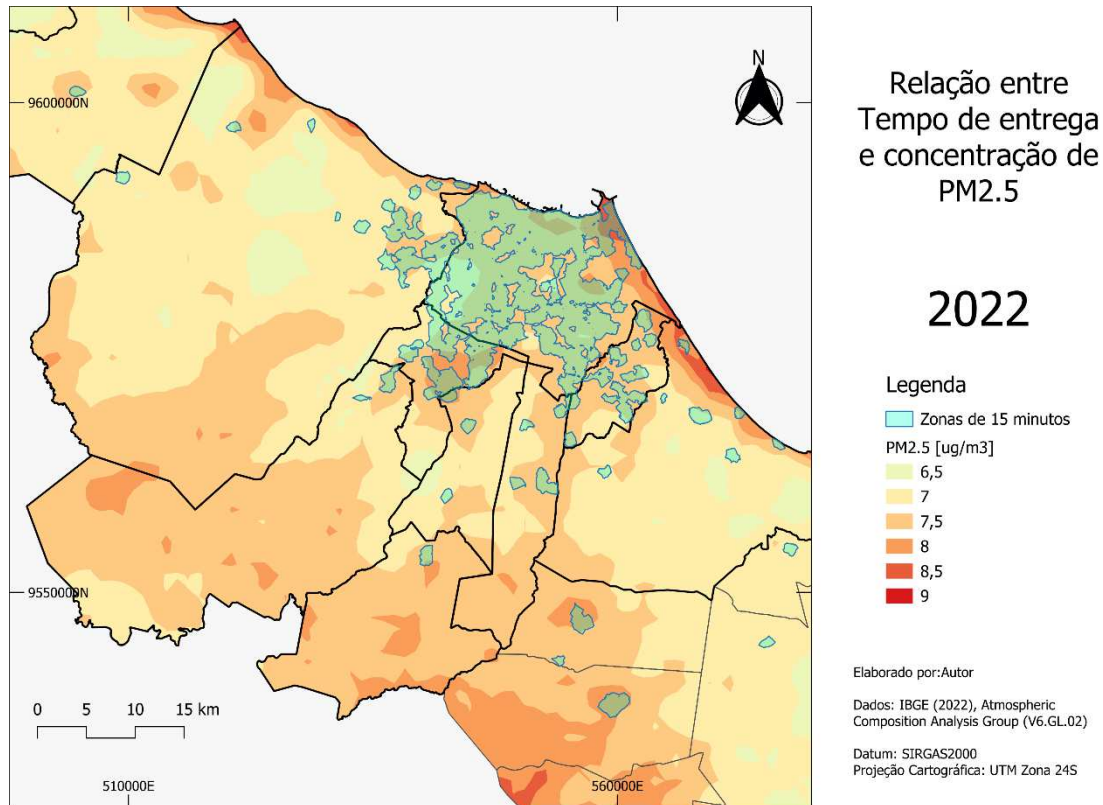
Fonte: elaborado pelo autor

Mapa 9 - Relação Tempo de Entrega / Concentração de PM2.5 na RMF em 2012



Fonte: elaborado pelo autor

Mapa 10 - Relação Tempo de Entrega / Concentração de PM2.5 na RMF em 2022



Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 4 – Relação Concentração Superficial de PM2.5 [ug/m3] em Zonas Tempo de Entrega 15 minutos, Zonas Urbanizadas e Area Total dos Municípios

Ano	15 minutos	Total	Urbano	15min / Total	15min / Urbano	Urbano / Total
2007	6,855	7,090	7,481	0,967	0,916	1,055
2012	5,924	5,970	6,406	0,992	0,925	1,073
2022	7,758	7,503	7,823	1,034	0,992	1,043

Fonte: elaborado pelo autor

Os resultados apresentados na Tabela 4 demonstram uma tendência de menor concentração de PM2.5 nas zonas de 15 minutos em comparação com a mancha urbana, conforme indicado pelas razões 15min/Urbano, que se mantêm abaixo de 1 ao longo dos anos analisados. Isso sugere que as áreas com maior acessibilidade dentro do conceito da Cidade de 15 Minutos apresentam, de forma consistente, uma qualidade do ar relativamente melhor que a média das áreas urbanizadas da região. Além disso, a razão Urbano/Total indica que a mancha urbana apresenta, em todas as medições, uma concentração de PM2.5 superior à

média total da região, evidenciando que o processo de urbanização pode estar diretamente relacionado ao aumento das emissões atmosféricas. No entanto, observa-se que, enquanto as zonas de 15 minutos apresentavam uma média inferior ao valor total nos anos de 2007 e 2012, essa relação se inverte em 2022, quando a razão 15min/Total ultrapassa 1. Esse resultado indica que, neste último período, as áreas de maior acessibilidade passaram a apresentar concentrações superiores à média regional, o que pode estar associado a processos de adensamento urbano ou mudanças na distribuição das fontes emissoras dentro dessas zonas. Essa inversão reforça a necessidade de estratégias de mitigação que integrem planejamento urbano e logística sustentável para garantir que o modelo da Cidade de 15 Minutos contribua efetivamente para a redução da poluição do ar.

## **5 CONCLUSÃO**

Este trabalho investigou o espraiamento urbano e logístico na RMF e seus impactos nas emissões de poluentes atmosféricos, com foco na concentração de PM<sub>2.5</sub> ao longo das últimas décadas. A análise espaço-temporal mostrou que, embora o espraiamento já ocorresse antes de 2000, foi após essa data que o fenômeno se intensificou, trazendo consigo um aumento significativo nas emissões, o que afeta diretamente a qualidade de vida da população e a sustentabilidade urbana.

Até o ano 2000, o transporte de mercadorias era mais concentrado no núcleo urbano, resultando em deslocamentos mais curtos e menores emissões. No entanto, a partir dessa década, o surgimento de novos polos logísticos em municípios periféricos aumentou as distâncias percorridas, alongando as rotas de transporte e elevando o tempo de deslocamento e o uso de combustíveis fósseis. Esse processo, embora tenha impulsionado o crescimento econômico e a distribuição de mercadorias para áreas mais afastadas, também gerou um aumento expressivo no tráfego de veículos pesados, impactando negativamente a qualidade do ar nas áreas urbanizadas e próximas a grandes rodovias.

Os resultados demonstram que, apesar de uma redução temporária das concentrações de PM<sub>2.5</sub> em 2012, houve um aumento expressivo da poluição em 2022, principalmente em Fortaleza e Maracanaú, onde a intensificação das atividades logísticas e a urbanização acelerada aumentaram as emissões. A exclusão das áreas ao sul da RMF, onde há influência natural de solo exposto da caatinga, possibilitou uma análise mais precisa da relação entre urbanização, mobilidade e qualidade do ar. Os dados reforçam que o espraiamento logístico e a descentralização urbana não foram acompanhadas de políticas

eficazes de controle ambiental, resultando em uma dependência crescente do transporte rodoviário e, conseqüentemente, no aumento da poluição atmosférica.

A Cidade de 15 Minutos surge como uma estratégia urbana viável para mitigar os impactos do transporte e da logística sobre a qualidade do ar, promovendo um modelo urbano mais sustentável e eficiente. A descentralização equilibrada das atividades econômicas e a redução da dependência do transporte rodoviário podem minimizar a necessidade de deslocamentos longos e reduzir as emissões de poluentes. Entretanto, a pesquisa aponta desafios estruturais na RMF, como a falta de infraestrutura adequada para modais sustentáveis e a predominância de um modelo de transporte baseado em veículos de carga movidos a diesel, limitando o potencial de transformação da mobilidade urbana.

Apesar da abordagem metodológica adotada, algumas limitações devem ser consideradas. Os dados de PM<sub>2.5</sub> utilizados possuem resolução global de 1 km<sup>2</sup> por pixel, o que pode dificultar a captura de variações espaciais mais sutis dentro da RMF. Além disso, fatores naturais, como áreas de solo exposto e dunas, podem interferir nas estimativas de poluição, exigindo um refinamento futuro das análises. Outra limitação está na ausência de dados locais de monitoramento da qualidade do ar, que poderiam fornecer uma calibração mais precisa para os resultados apresentados. Essas questões indicam a necessidade de futuras pesquisas que incorporem sensores ambientais locais e estudos complementares sobre a dispersão de poluentes, permitindo uma compreensão ainda mais aprofundada sobre os impactos da logística urbana na qualidade do ar.

A partir dos achados deste estudo, algumas recomendações podem ser feitas para pesquisas futuras. Primeiramente, sugere-se a ampliação da análise da qualidade do ar, incorporando dados de sensores locais e estações de monitoramento, permitindo maior precisão na avaliação das emissões de PM<sub>2.5</sub> e sua dispersão espacial, assim como o uso de outros poluentes, como NO<sub>x</sub> e CO<sub>2</sub>.

Outro ponto de interesse é a análise dos efeitos sociais e de saúde pública relacionados à poluição atmosférica na RMF, avaliando a correlação entre a exposição ao PM<sub>2.5</sub> e indicadores de doenças respiratórias e cardiovasculares. Esse tipo de estudo poderia fornecer subsídios importantes para políticas ambientais e urbanas, orientando medidas mais eficazes para mitigar os impactos da poluição. Além disso, futuras pesquisas podem aprofundar a viabilidade do modelo da Cidade de 15 Minutos na RMF, avaliando como a reorganização dos fluxos urbanos pode contribuir para a redução da poluição sem comprometer a eficiência logística da região.

Diante dos desafios identificados, é evidente que a integração entre planejamento urbano, políticas ambientais e inovação tecnológica será fundamental para garantir um desenvolvimento mais sustentável da RMF, permitindo que a região cresça de forma mais resiliente às mudanças climáticas e às demandas da logística contemporânea.

## REFERÊNCIAS

SANTOS, Milton. **Por uma outra globalização: do pensamento único à consciência universal**. Rio de Janeiro: Record, 2000.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo 2022**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022.

CAVALCANTE, C. B.; LOPES, A. S.; CAPASSO, M. M.; LOUREIRO, C. F. G. **Análise dos planos diretores de Fortaleza sob o paradigma do planejamento da acessibilidade e mobilidade da Urbe Sustentável**. *urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana*, v. 12, p. e20190271, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2175-3369.012.e20190271>. Acesso em: 8 out. 2024.

CANAN, William. **Inimigo invisível: a poluição do óleo diesel**. Florianópolis: Cotidiano UFSC, 2022. Disponível em: <https://cotidiano.sites.ufsc.br/inimigo-invisivel-a-poluicao-do-oleo-diesel/>. Acesso em: 14 out. 2024.

BRITO, B. R. A.; ARAÚJO, K. G. G.; BERTONCINI, B. V. **Análise da evolução do tempo de entrega dos estabelecimentos atacadistas em Fortaleza, Ceará**. In: **RIO DE TRANSPORTES**, 20., 2023, Rio de Janeiro. Anais [...]. Rio de Janeiro: Rio de Transportes, 2023. Disponível em: <https://riodetransportes.org.br/20rdt/trabalhos/trabalhos/AC-LO-096.pdf>. Acesso em: 11 out. 2024.

LIMA, L. S.; LOUREIRO, C. F. G.; SOUSA, F. F. L. M.; LOPES, A. S. **Espraiamento urbano e seus impactos nas desigualdades socioespaciais da acessibilidade ao trabalho em Fortaleza**. *Transportes*, v. 29, n. 1, p. 229-246, 2021.

PEQUENO, L. R. B.; COSTA, M. C. L. **Fortaleza: transformações na ordem urbana**. In: **METRÓPOLES BRASILEIRAS: síntese da transformação da ordem urbana 1980 a 2010**. Fortaleza: Observatório das Metrôpoles, 2015.

BARBIERI, Lorenzo; D'AUTILIA, Roberto; MARRONE, Paola; MONTELLA, Ilaria. **Graph Representation of the 15-Minute City: a comparison between Rome, London, and Paris**. *Sustainability*, [S.L.], v. 15, n. 4, p. 3772, 18 fev. 2023. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su15043772>.

MORENO, C.; ALLAM, Z.; CHABAUD, D.; GALL, C.; PRATLONG, F. **Introducing the “15-Minute City”: Sustainability, Resilience and Place Identity in Future Post-Pandemic Cities.** *Smart Cities*, v. 4, n. 1, p. 93-111, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/smartcities4010006>. Acesso em: 8 out. 2024.

POMIANEK, Iwona. **The benefits of the 15-minute city – a logistical approach.** *Ekonomika i Organizacja Logistyki*, v. 8, n. 4, p. 59-69, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.22630/EIOL.2023.8.4.29>. Acesso em: 3 mar. 2025.

ROUSE, J. W. et al. **Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS.** In: NASA. *Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium*, 1974, Washington, D.C. Proceedings... Washington, D.C.: NASA SP-351, 1974. v. 1, p. 309-317. Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19740022555>. Acesso em: 8 out. 2024.

ZHAO, Hongmei; CHEN, Xiaoling. **Use of normalized difference bareness index in quickly mapping bare areas from TM/ETM+.** In: *Proceedings. 2005 IEEE International Geoscience And Remote Sensing Symposium*, 2005. Igarss '05. [S.L.], v. 3, p. 1666-1668, 14 nov. 2005. IEEE. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/igarss.2005.1526319>. Acesso em: 8 out. 2024.

ZHA, Y.; GAO, J.; NI, S. **Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery.** *International Journal of Remote Sensing*, [S.L.], v. 24, n. 3, p. 583-594, jan. 2003. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/01431160304987>. Acesso em: 8 out. 2024.

DABLANC, Laetitia; RAKOTONARIVO, Dina. **The impacts of logistics sprawl: How does the location of parcel transport terminals affect the energy efficiency of goods' movements in Paris and what can we do about it?.** *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, v. 2, n. 3, p. 60876096, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2010.04.021>. Acesso em: 8 out. 2024.

BREIMAN, L. **Random Forests.** *Machine Learning*, v. 45, n. 1, p. 5-32, 2001. DOI: 10.1023/A:1010933404324. Acesso em: 8 out. 2024

BRASIL. **Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI)**. *Resultados do Inventário Nacional de Emissões de Gases de Efeito Estufa por Unidade da Federação*. Brasília, DF: MCTI, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br>. Acesso em: 2 jan. 2025.

CARVALHO, C. H. R. de. **Emissões relativas de poluentes do transporte motorizado de passageiros nos grandes centros urbanos brasileiros**. Brasília, DF: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA, 2011. (Texto para Discussão, n. 1606). Disponível em: <https://www.ipea.gov.br>. Acesso em: [data de acesso] 2 jan. 2025.

SHEN, Haotian; VAN DONKELAAR, Aaron; MARTIN, Randall V.; et al. **Enhancing global estimation of fine particulate matter concentrations by including geophysical a priori information in deep learning**. *ACS Environmental Science & Technology Ai*, [s.l.], v. 4, n. 1, p. 12-21, 2024. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acsestair.3c00054>. Acesso em: 4 mar. 2025.