

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO, CONTABILIDADE E GESTÃO DE  
POLÍTICAS PÚBLICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECONOMIA  
DOUTORADO EM ECONOMIA

MARIANA OLIVEIRA E SILVA BACCIOTTI

***FORMA URBANA E EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA NO BRASIL***

BRASÍLIA

2025

MARIANA OLIVEIRA E SILVA BACCIOTTI

***FORMA URBANA E EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA NO BRASIL***

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Economia da Universidade de Brasília (UnB), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor(a) em Economia.

Área de Concentração: Economia e Política do Meio Ambiente e da Agricultura

Orientador: Prof. Dr. Marcelo de Oliveira Torres

BRASÍLIA

2025

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Ficha Catalográfica

|  |
|--|
|  |
|--|

BACCIOTTI, Mariana Oliveira e Silva. **Forma Urbana e Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil**. 2025. 181 f. Tese (Doutorado em Economia – Programa de Pós-graduação em Economia). Brasília: Universidade de Brasília – UnB, 2025.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Marcelo de Oliveira Torres  
Universidade de Brasília – UnB  
Orientador

---

Prof. Dr. Jorge Madeira Nogueira  
Universidade de Brasília – UnB  
Membro Interno

---

Prof. Dr. Ciro Biderman  
Escola de Administração de Empresas da Fundação Getúlio  
Vargas (EAESP/FGV)  
Membro Externo

---

Profa. Dra. Mayumi Cursino de Moura Hirye  
Institute of the Environment and Sustainability - IoES / UCLA  
Membro Externo

Brasília, \_\_\_\_ de \_\_\_\_ de \_\_\_\_.

Ao meu filho, que me trouxe a força, a coragem e o frescor necessários para seguir em frente.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade de Brasília e aos docentes, técnicos e colegas do Programa de Pós-graduação em Economia pela oportunidade de cursar o doutorado em um ambiente de acolhimento, pluralidade e dedicação ao conhecimento. Agradeço especialmente ao meu orientador, Marcelo, pelos ensinamentos, pela liberdade para desenvolver a pesquisa e pela objetividade nas discussões e nos momentos difíceis. Também agradeço a Rafael Terra e Andrei Cechin por suas contribuições na qualificação; à Daniela Freddo, que me apoiou desde minha candidatura ao doutorado; ao Pedro Henrique Oliveira de Souza, pelo auxílio técnico; e aos membros da banca examinadora, Jorge Nogueira, Ciro Biderman e Mayumi Hirye, pela leitura atenta, comentários valiosos, críticas construtivas e sugestões enriquecedoras. Agradeço também aos alunos que tive nos últimos anos, cujo interesse e brilho no olhar são fontes de inspiração, desafio e impulso para seguir me aperfeiçoando.

Agradeço a toda minha família e amigos, fontes essenciais de amor e suporte. Em especial, ao meu marido, parceiro carinhoso e grande incentivador dessa jornada, pela escuta generosa sobre os achados e percalços na pesquisa, pelo apoio diário e por se desdobrar para estar presente para nosso filho nos momentos em que precisei me ausentar. À minha mãe, pelo exemplo de superação e garra e por toda ajuda – das remotas lições de casa ao atual suporte emocional. Ao meu pai, por alimentar sonhos, ser conselheiro e mover mundos para proporcionar oportunidades raras e improváveis na realidade da qual viemos. À minha tia Jô, sempre presente, entusiasta e incentivadora. Aos meus sogros pelo apoio e compreensão, particularmente ao Fredy (*in memorian*), cuja paixão pelo urbanismo me contagiou. Aos meus avôs (*in memorian*), tão diferentes entre si, que me deixaram como legados o senso de trabalho, curiosidade e generosidade. Às minhas avós (*in memorian*), mulheres doces e fortes, que exerceram dignamente seus papéis familiares, formando a base que permitiu a cada geração dar um passo além. Se uma neta de avó analfabeta alça voos ao doutoramento universitário, certamente teve família, amigos e professores excepcionais a apoiá-la. A todos, meu muito obrigada.

Este trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), por meio do Programa de Excelência Acadêmica (PROEX).

*A forma de nossas cidades molda a forma de nossas vidas.*

Jan Gehl

*A maior ameaça ao nosso planeta é a crença de que outra pessoa irá salvá-lo.*

Robert Charles Swan



## RESUMO GERAL

Esta tese reúne três artigos independentes, mas inter-relacionados, e investiga aspectos relacionados à forma urbana no Brasil e sua relação com as emissões de gases de efeito estufa (GEE). O primeiro artigo examina o impacto da densidade sobre as emissões. Uma métrica de densidade urbana é utilizada para capturar a relação entre população e área da mancha urbana, excluindo grandes áreas rurais frequentemente incluídas em índices convencionais de densidade demográfica. Análises de regressão em painel demonstram que a densidade específica da área urbana desempenha um papel significativo na redução das emissões de GEE, mesmo após o controle de variáveis como desenvolvimento econômico e tamanho populacional. As conclusões aplicam-se a diferentes escalas geográficas consideradas – 27 estados, 137 mesorregiões, 558 microrregiões e 4298 áreas mínimas comparáveis (AMC) – no período de 1991-2010. O segundo artigo desenvolve uma base de dados com métricas espaciais para aprofundar a caracterização da forma urbana no Brasil. Amplia-se o olhar para além da densidade urbana, considerando-se aspectos espaciais ligados à forma urbana, identificando-se as diferenças entre áreas e avaliando-se mudanças ao longo do tempo. Mapas de uso e ocupação do solo foram utilizados para estimar métricas de paisagem e derivar indicadores para as 187 concentrações urbanas brasileiras médias e grandes nos anos de 1985, 1991, 2000, 2010, 2015 e 2022. Por meio do pacote *landscapemetrics* no software R, foram gerados cinco indicadores: extensão urbana, complexidade dos fragmentos, complexidade dos limites urbanos, centralidade e compacidade. Os resultados mostram que a área urbana média aumentou de 36,69 km<sup>2</sup> (1985) para 103,60 km<sup>2</sup> (2022), com maior centralidade e redução na complexidade dos fragmentos e dos limites urbanos. Concentrações com maior PIB per capita e IDH apresentaram maior extensão urbana e centralidade, mas menor complexidade dos fragmentos e limites, sem diferenças estatísticas na compacidade. Por fim, o terceiro artigo utiliza as métricas desenvolvidas no segundo para aprofundar a análise da relação entre forma urbana e emissões de GEE. Foi criado um indicador de dispersão urbana, que integra aspectos ligados a fragmentação, centralidade e compacidade a partir dos indicadores desenvolvidos no artigo 2. Um modelo STIRPAT modificado foi aplicado às concentrações urbanas de médio e grande porte no Brasil, cobrindo o período de 1991 a 2010. Os resultados revelam que a densidade urbana está associada a uma redução nas emissões de GEE per capita, com elasticidade estimada de -0,737, enquanto a dispersão aumenta as emissões, com elasticidade de 2,915. Esses achados reforçam a necessidade de políticas urbanas que promovam densificação, compactação e redução da fragmentação, associadas ao incentivo ao transporte público e à mobilidade ativa. Regulamentações de uso do solo e instrumentos fiscais, ajustados ao contexto local, podem contribuir para o desenvolvimento de estruturas urbanas menos poluentes.

**Palavras-Chave:** densidade, emissões de gases de efeito estufa, forma urbana, espraiamento, fragmentação, centralidade

## GENERAL ABSTRACT

This thesis comprises three independent but interrelated papers investigating aspects of urban form in Brazil and its relationship with greenhouse gas (GHG) emissions. The first paper examines the impact of density on emissions. Using an urban density metric that captures the relationship between population and urban area—while excluding large rural areas often included in conventional demographic density indices—panel regression analyses demonstrate that urban-area-specific density significantly reduces GHG emissions. This effect persists even after controlling for variables such as economic development and population size. The findings hold across multiple geographical scales (27 states, 137 mesoregions, 558 microregions, and 4,298 comparable minimum areas [AMC]) over the period from 1991 to 2010. The second paper develops a spatial metrics database to characterize Brazil's urban form in greater depth. Expanding the analysis beyond urban density, it incorporates spatial aspects of urban form to identify regional differences and temporal changes. Land use and land cover maps were used to estimate landscape metrics for 187 medium and large Brazilian urban concentrations in 1985, 1991, 2000, 2010, 2015, and 2022. Using the landscapemetrics package in R, five indicators were generated: urban extent, fragment complexity, urban boundary complexity, centrality, and compactness. Results show that the average urban area increased from 36.69 km<sup>2</sup> (1985) to 103.60 km<sup>2</sup> (2022), with greater centrality and reduced fragment and boundary complexity. Urban concentrations with higher GDP per capita and HDI exhibited larger urban extents and centrality but lower fragment and boundary complexity, though compactness showed no statistically significant differences. The third paper leverages the metrics from the second to further explore the relationship between urban form and GHG emissions. An urban sprawl indicator was developed, integrating fragmentation, centrality, and compactness based on Paper 2's framework. Applying a modified STIRPAT model to medium and large urban concentrations in Brazil (1991–2010), the results indicate that urban density is associated with reduced per capita GHG emissions (elasticity:  $-0.737$ ), while sprawl increases emissions (elasticity:  $2.915$ ). These findings underscore the importance of urban policies promoting densification, compactness, and reduced fragmentation, alongside incentives for public transportation and active mobility. Context-sensitive land use regulations and fiscal instruments could further support the development of less carbon-intensive urban structures.

**Keywords:** density, greenhouse gas emissions, urban form, sprawl, fragmentation, centrality

## **Lista de Figuras**

|                                                                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1.A-1:</b> Etapas da Methodi Ordinatio e a utilização das tecnologias da informação e comunicação (TICs) em cada etapa..... | 49 |
| <b>Figura 2-1:</b> Níveis das métricas de paisagem.....                                                                               | 79 |
| <b>Figura 2-2:</b> Ilustração esquemática de métricas espaciais seleccionadas .....                                                   | 80 |

## Lista de Gráficos

|                                                                                                                                                                                      |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Gráfico 1.A-1:</b> Número de citações e publicações ao longo do tempo .....                                                                                                       | 53  |
| <b>Gráfico 1.A-2:</b> Número de documentos por ano .....                                                                                                                             | 57  |
| <b>Gráfico 2-1:</b> Boxplot com métricas espaciais por região geográfica - 2010 .....                                                                                                | 96  |
| <b>Gráfico 2-2:</b> Função densidade e dispersão Boxplot para métricas espaciais por tipo de concentração urbana .....                                                               | 99  |
| <b>Gráfico 2-3:</b> Taxa média de crescimento ao ano nas concentrações urbanas por período ....                                                                                      | 105 |
| <b>Gráfico 2-4:</b> Taxa média de crescimento anual entre 1985 e 2022 dos indicadores de forma urbana por tipo de concentração .....                                                 | 106 |
| <b>Gráfico 2-5:</b> Função densidade e dispersão Boxplot para métricas espaciais para concentrações urbanas com maior e menor índice de desenvolvimento humano (IDH) em 2010 .....   | 111 |
| <b>Gráfico 2.A-1:</b> Número de citações e publicações ao longo do tempo .....                                                                                                       | 119 |
| <b>Gráfico 2.A-2:</b> Número de documentos por ano .....                                                                                                                             | 123 |
| <b>Gráfico 2.A-3:</b> Histogramas com métricas no nível do patch em São Paulo - 2015 .....                                                                                           | 134 |
| <b>Gráfico 2.A-4:</b> Histogramas com métricas no nível do patch em São Paulo após exclusão de outliers .....                                                                        | 135 |
| <b>Gráfico 2.C-1:</b> Função densidade e dispersão Boxplot para métricas espaciais para concentrações urbanas com maior e menor índice de desenvolvimento humano (IDH) em 2010 ..... | 140 |
| <b>Gráfico 3-1:</b> Relação entre densidade urbana e o índice de dispersão para grandes concentrações urbanas .....                                                                  | 155 |

## Lista de Mapas

|                                                                                                                                                  |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Mapa 1-1:</b> Emissões Urbanas de Gases de Efeito Estufa brutas em 2010 por AMC .....                                                         | 32  |
| <b>Mapa 1-2:</b> Concentração urbana de São Paulo com limites administrativos municipais e área urbanizada correspondente .....                  | 34  |
| <b>Mapa 2-1:</b> Área dos fragmentos em concentrações urbanas selecionadas em 2022 .....                                                         | 90  |
| <b>Mapa 2-2:</b> Exemplos de formas urbanas com valores elevados das métricas espaciais - 2022 .....                                             | 92  |
| <b>Mapa 2-3:</b> Formas urbanas com diferentes valores para AWMSI e AWMPFD entre as grandes concentrações – 2022 .....                           | 103 |
| <b>Mapa 2-4:</b> Formas urbanas com diferentes valores para CE e CI entre as grandes concentrações – 2022.....                                   | 104 |
| <b>Mapa 2.B-1:</b> Limites administrativos e taxa de urbanização dos municípios pertencentes à concentração urbana de Brasília .....             | 129 |
| <b>Mapa 2.B-2:</b> Cobertura de uso e ocupação do solo na concentração urbana de São Paulo em 2022 .....                                         | 129 |
| <b>Mapa 2.B-3:</b> Dados vetoriais das rodovias na concentração urbana do Rio de Janeiro .....                                                   | 133 |
| <b>Mapa 2.B-4:</b> Área urbaniza antes e depois da exclusão das rodovias em São Paulo .....                                                      | 134 |
| <b>Mapa 2.B-5:</b> Área urbanizada nas concentrações urbanas de São Paulo e Brasília* .....                                                      | 136 |
| <b>Mapa 2.B-6:</b> Comparativo entre imagem de satélite da concentração urbana de São Paulo e sobreposição com respectiva área urbanizada* ..... | 137 |
| <b>Mapa 2.C-1:</b> Exemplos de formas urbanas em concentrações médias – 2022 .....                                                               | 139 |
| <b>Mapa 3-1:</b> Concentração urbana de Belém/PA com limites administrativos municipais e área urbanizada correspondente .....                   | 152 |

## **Lista de Quadros**

|                                                                                                                                           |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Quadro 1-1:</b> Impactos estimados empiricamente da urbanização e da densidade urbana sobre as emissões de gases de efeito estufa..... | 28  |
| <b>Quadro 2-1:</b> As principais categorias, conceitos e indicadores da forma urbana em macro-escala – cidade e área metropolitana .....  | 75  |
| <b>Quadro 2.B-1:</b> Principais métricas de paisagem urbana, fórmula e definição .....                                                    | 126 |
| <b>Quadro 2.B-2:</b> Códigos da legenda para os valores de pixel na Coleção 8 do MapBiomas.....                                           | 128 |
| <b>Quadro 2.B-3:</b> Sistemas Referência de Coordenadas .....                                                                             | 130 |
| <b>Quadro 2.B-4:</b> Características dos Sistemas de Coordenadas.....                                                                     | 131 |
| <b>Quadro 3.A-1:</b> Dimensões da configuração urbana – indicadores selecionados .....                                                    | 177 |
| <b>Quadro-Resumo:</b> Principais objetivos, métodos e resultados de cada artigo desenvolvido .....                                        | 181 |

## Lista de Tabelas

|                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabela 1-1:</b> Estatísticas descritivas para todas as AMC's nos períodos disponíveis – Brasil e Grandes Regiões .....      | 35 |
| <b>Tabela 1-2:</b> Principais estimações no nível das AMC's .....                                                              | 37 |
| <b>Tabela 1-3:</b> Principais resultados das estimações no nível das microrregiões, mesorregiões e Unidades da Federação ..... | 40 |
| <b>Tabela 1.A-1:</b> Buscas por palavras-chave, filtro e número de documentos encontrados .....                                | 52 |
| <b>Tabela 1.A-2:</b> Autores com maior destaque no tema de pesquisa, por número de documentos e citações .....                 | 53 |
| <b>Tabela 1.A-3:</b> Localização geográfica das instituições voltadas à pesquisa, por número de documentos e citações .....    | 53 |
| <b>Tabela 1.A-4:</b> Principais revistas com publicações no tema, por número de documentos e citações .....                    | 54 |
| <b>Tabela 1.A-5:</b> Trabalhos com maior número de co-citações .....                                                           | 54 |
| <b>Tabela 1.A-6:</b> Resultado final da seleção de artigos com base no Methodi Ordinatio e filtros próprios .....              | 55 |
| <b>Tabela 1.A-7:</b> Buscas por palavras-chave, filtro e número de documentos encontrados .....                                | 56 |
| <b>Tabela 1.A-8:</b> Resultado final da seleção de artigos com base no Methodi Ordinatio e filtros próprios .....              | 58 |
| <b>Tabela 1.A-9:</b> Impactos estimados empiricamente da urbanização e da densidade urbana sobre a poluição do ar .....        | 59 |
| <b>Tabela 1.C-1:</b> Matriz de correlação de Pearson – principais variáveis em 1991 .....                                      | 65 |
| <b>Tabela 1.C-2:</b> Matriz de correlação de Pearson – principais variáveis em 2000 .....                                      | 65 |
| <b>Tabela 1.C-3:</b> Matriz de correlação de Pearson – principais variáveis em 2010 .....                                      | 65 |
| <b>Tabela 1.C-4:</b> Testes com diferentes variáveis no nível das AMC's .....                                                  | 66 |
| <b>Tabela 1.C-5:</b> Estimações no nível das microrregiões – POLS, EF e EA .....                                               | 67 |
| <b>Tabela 1.C-6:</b> Estimações no nível das mesorregiões – POLS, EF e EA .....                                                | 68 |
| <b>Tabela 1.C-7:</b> Estimações no nível das UF's – POLS, EF e EA .....                                                        | 69 |
| <b>Tabela 2-1:</b> Dimensões da configuração urbana – indicadores selecionados .....                                           | 86 |
| <b>Tabela 2-2:</b> Estatísticas descritivas por métrica espacial e ano .....                                                   | 91 |
| <b>Tabela 2-3:</b> Análise da correlação de Pearson entre métricas espaciais (2010 <sup>1</sup> ) .....                        | 93 |
| <b>Tabela 2-4:</b> Análise da correlação de Pearson entre a Extensão Urbana (CA) e demais métricas espaciais por ano .....     | 94 |
| <b>Tabela 2-5:</b> Estatísticas descritivas por métrica espacial e região geográfica - 2010 .....                              | 94 |
| <b>Tabela 2-6:</b> Testes de Levene para homogeneidade da variância e de Shapiro-Wilk para normalidade dos resíduos .....      | 97 |
| <b>Tabela 2-7:</b> Estatísticas descritivas por métrica espacial, tipo de concentração e ano de análise .....                  | 98 |

|                                                                                                                                                       |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Tabela 2-8:</b> Testes estatísticos para comparação de médias entre concentrações grandes e médias em 2010 .....                                   | 100 |
| <b>Tabela 2-9:</b> Métricas espaciais por concentração urbana e <i>ranking</i> entre as Grandes Concentrações em 2022 .....                           | 102 |
| <b>Tabela 2-10:</b> Análise da correlação de Pearson entre métricas espaciais e medidas de densidade (1991, 2000 e 2010) .....                        | 107 |
| <b>Tabela 2-11:</b> Análise da correlação de Pearson entre a forma urbana e fatores socioeconômicos e ambientais - 2010 .....                         | 109 |
| <b>Tabela 2-12:</b> Testes estatísticos para comparação de médias entre concentrações com maior e menor nível de renda per capita em 2010 .....       | 110 |
| <b>Tabela 2-13:</b> Testes estatísticos para comparação de médias entre concentrações com maior e menor nível de desenvolvimento humano em 2010 ..... | 112 |
| <b>Tabela 2.A-1:</b> Buscas por palavras-chave, filtro e número de documentos encontrados .....                                                       | 119 |
| <b>Tabela 2.A-2:</b> Principais revistas com publicações no tema, por número de documentos e citações .....                                           | 120 |
| <b>Tabela 2.A-3:</b> Principais autores e grupo de autores, por número de documentos e citações .....                                                 | 120 |
| <b>Tabela 2.A-4:</b> Resultado final da seleção de artigos com base no Methodi Ordinatio e filtros próprios .....                                     | 121 |
| <b>Tabela 2.A-5:</b> Buscas por palavras-chave, filtro e número de documentos encontrados .....                                                       | 122 |
| <b>Tabela 2.A-6:</b> Resultado final da seleção de artigos com base no Methodi Ordinatio e filtros próprios .....                                     | 124 |
| <b>Tabela 2.B-1:</b> População total, urbana e rural e grau de urbanização por município: .....                                                       | 125 |
| <b>Tabela 2.B-2:</b> Métricas de paisagem disponíveis no pacote <i>landscapemetrics</i> tipo de métrica - Nível do fragmento ( <i>patch</i> ) .....   | 126 |
| <b>Tabela 2.B-3:</b> Fontes de informações de áreas urbanizadas no Brasil – Mapbiomas e IBGE .....                                                    | 127 |
| <b>Tabela 2.C-1:</b> Análise de correlação entre métricas espaciais por ano .....                                                                     | 138 |
| <b>Tabela 3-1:</b> Estatísticas descritivas <sup>1</sup> .....                                                                                        | 158 |
| <b>Tabela 3-2:</b> Testes para modelos em painel .....                                                                                                | 159 |
| <b>Tabela 3-3:</b> Resultados da regressão em painel para Emissões Urbanas de GEE .....                                                               | 160 |
| <b>Tabela 3-4:</b> Resultados da regressão em painel para Emissões Urbanas de GEE per capita .....                                                    | 161 |
| <b>Tabela 3.A-1:</b> Análise da correlação de Pearson entre variáveis selecionadas .....                                                              | 178 |
| <b>Tabela 3.A-2:</b> Resultados da regressão em painel para Emissões Urbanas de GEE .....                                                             | 178 |
| <b>Tabela 3.A-3:</b> Resultados da regressão em painel para Emissões Urbanas de GEE .....                                                             | 179 |



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|                         |                                                                                                                                                              |
|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>AMC</b>              | Áreas mínimas comparáveis                                                                                                                                    |
| <b>ANOVA</b>            | <i>Analysis of Variance</i> (Análise de Variância)                                                                                                           |
| <b>AR5</b>              | Quinto Relatório de Avaliação                                                                                                                                |
| <b>ATBD</b>             | Documento Base Teórico do Algoritmo                                                                                                                          |
| <b>AWMPFD</b>           | <i>Area-weighted Mean Patch Fractal Dimension</i> (Dimensão fractal média ponderada por área)                                                                |
| <b>AWMSI</b>            | <i>Area-Weighted Mean Shape Index</i> (Índice de forma média ponderada por área)                                                                             |
| <b>CA</b>               | Extensão urbana                                                                                                                                              |
| <b>CE</b>               | Índice de Centralidade                                                                                                                                       |
| <b>CI</b>               | Índice de compacidade                                                                                                                                        |
| <b>CH<sub>4</sub></b>   | Metano                                                                                                                                                       |
| <b>CO<sub>2</sub></b>   | Dióxido de carbono ou Gás carbônico                                                                                                                          |
| <b>CRS</b>              | <i>Coordinate Reference System</i> (Sistema de Referência de Coordenadas)                                                                                    |
| <b>EA</b>               | Efeitos Aleatórios                                                                                                                                           |
| <b>EF</b>               | Efeitos fixos                                                                                                                                                |
| <b>EKC</b>              | <i>Environmental Kuznets Curve</i> (Curva Ambiental de Kuznets)                                                                                              |
| <b>FJP</b>              | Fundação João Pinheiro                                                                                                                                       |
| <b>GEE</b>              | Gases de efeito estufa                                                                                                                                       |
| <b>GWP</b>              | <i>Global Warming Potential</i> (Potencial de Aquecimento Global)                                                                                            |
| <b>IBGE</b>             | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística                                                                                                              |
| <b>IDH</b>              | Índice de Desenvolvimento Humano                                                                                                                             |
| <b>IDHM</b>             | Índice de Desenvolvimento Humano Municipal                                                                                                                   |
| <b>IPCC</b>             | <i>The Intergovernmental Panel on Climate Change</i> (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas)                                                   |
| <b>IPEA</b>             | Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada                                                                                                                     |
| <b>IPEADATA</b>         | Repositório de Dados do IPEA                                                                                                                                 |
| <b>STIRPAT</b>          | <i>Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence, and Technology</i> (Impactos Estocásticos por Regressão sobre População, Riqueza e Tecnologia) |
| <b>MCTI</b>             | Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação                                                                                                                 |
| <b>N<sub>2</sub>O</b>   | Óxido nitroso                                                                                                                                                |
| <b>NO<sub>2</sub></b>   | Dióxido de nitrogênio                                                                                                                                        |
| <b>OCDE</b>             | Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico                                                                                                    |
| <b>ONU</b>              | Organização das Nações Unidas                                                                                                                                |
| <b>PIB</b>              | Produto Interno Bruto                                                                                                                                        |
| <b>PM<sub>2,5</sub></b> | Material Particulado fino (partículas suspensas no ar com diâmetro aerodinâmico igual ou inferior a 2,5 micrômetros)                                         |
| <b>PNUD</b>             | Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento                                                                                                            |
| <b>POLS</b>             | <i>Pooled Ordinary Least Squares</i> (Mínimos quadrados ordinários agrupados)                                                                                |
| <b>SEEG</b>             | Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa                                                                                      |
| <b>SENATRAM</b>         | Secretaria Nacional de Trânsito                                                                                                                              |
| <b>SIRGAS 2000</b>      | Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas 2000                                                                                                      |
| <b>UF</b>               | Unidades da Federação                                                                                                                                        |
| <b>WGS84</b>            | <i>World Geodetic System 1984</i> (Sistema Geodésico Mundial 1984)                                                                                           |

## SUMÁRIO

|                                                                                                                                                                        |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>INTRODUÇÃO GERAL .....</b>                                                                                                                                          | <b>19</b>  |
| <b>Estrutura da Tese.....</b>                                                                                                                                          | <b>21</b>  |
| <b>1. O IMPACTO DA DENSIDADE URBANA NAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA: EVIDÊNCIAS PARA O BRASIL EM MÚLTIPLAS ESCALAS COM DADOS EM PAINEL .....</b>                | <b>22</b>  |
| 1.1. Introdução.....                                                                                                                                                   | 22         |
| 1.2. População, densidade e poluição: revisão da literatura .....                                                                                                      | 24         |
| 1.3. Estratégia empírica .....                                                                                                                                         | 29         |
| 1.4. Resultados .....                                                                                                                                                  | 35         |
| 1.5. Discussões.....                                                                                                                                                   | 40         |
| 1.6. Conclusões.....                                                                                                                                                   | 43         |
| <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                                                                                                                               | <b>44</b>  |
| <b>APÊNDICE 1.A. Revisão sistemática da literatura .....</b>                                                                                                           | <b>48</b>  |
| <b>APÊNDICE 1.B. Moldura teórica detalhada .....</b>                                                                                                                   | <b>60</b>  |
| <b>APÊNDICE 1.C. Dados e resultados adicionais.....</b>                                                                                                                | <b>65</b>  |
| <b>2. ANÁLISE DA FORMA URBANA EM CONCENTRAÇÕES BRASILEIRAS: MÉTRICAS ESPACIAIS A PARTIR DE DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO .....</b>                                     | <b>70</b>  |
| 2.1. Introdução.....                                                                                                                                                   | 70         |
| 2.2. Definição e Mensuração da Forma Urbana.....                                                                                                                       | 71         |
| 2.3. Metodologia .....                                                                                                                                                 | 77         |
| 2.4. Resultados .....                                                                                                                                                  | 90         |
| 2.5. Considerações finais.....                                                                                                                                         | 112        |
| <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                                                                                                                               | <b>115</b> |
| <b>APÊNDICE 2.A. Revisão sistemática da literatura .....</b>                                                                                                           | <b>118</b> |
| <b>APÊNDICE 2.B. Metodologia detalhada para cálculo das métricas espaciais ....</b>                                                                                    | <b>125</b> |
| <b>APÊNDICE 2.C. Dados e Resultados Adicionais.....</b>                                                                                                                | <b>138</b> |
| <b>3. IMPACTOS DA CONFIGURAÇÃO ESPACIAL URBANA NAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA: ANÁLISE DA DENSIDADE E DISPERSÃO NAS CONCENTRAÇÕES URBANAS BRASILEIRAS.....</b> | <b>141</b> |
| 3.1. Introdução.....                                                                                                                                                   | 141        |
| 3.2. As Emissões de Gases de Efeito Estufa e Forma Urbana .....                                                                                                        | 143        |
| 3.3. Dados .....                                                                                                                                                       | 150        |
| 3.4. Especificação do modelo empírico.....                                                                                                                             | 156        |
| 3.5. Resultados estimados .....                                                                                                                                        | 159        |
| 3.6. Discussões e Limitações .....                                                                                                                                     | 162        |
| 3.7. Implicações para Políticas Públicas.....                                                                                                                          | 164        |
| 3.8. Conclusões.....                                                                                                                                                   | 167        |
| <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                                                                                                                               | <b>169</b> |
| <b>APÊNDICE 3.A. Definições e Resultados Adicionais .....</b>                                                                                                          | <b>177</b> |
| <b>CONCLUSÃO GERAL .....</b>                                                                                                                                           | <b>180</b> |

## Introdução Geral

As discussões sobre cidades e emissões de poluentes têm ganhado destaque nas últimas décadas, sendo sua intersecção um tema interdisciplinar que permeia a economia, a ecologia, o planejamento urbano e as políticas públicas. O crescimento urbano acelerado e os desafios ambientais colocam as cidades no centro do debate sobre desenvolvimento sustentável, demandando abordagens que integrem eficiência econômica, justiça social e proteção ambiental. No Brasil, a urbanização acelerada frequentemente ocorre de forma desordenada<sup>1</sup>, conferindo uma importância especial a essa agenda. No âmbito econômico, as cidades são vistas como motores do crescimento e da inovação, mas também como fontes significativas de externalidades negativas, como congestionamento, poluição e emissões de carbono.

Jane Jacobs, em sua obra clássica “Morte e Vida de Grandes Cidades” (1961), foi pioneira ao enfatizar que a densidade populacional e a diversidade de usos do solo promovem a criatividade e o dinamismo econômico, propiciando a criação de ambientes urbanos resilientes. Para a autora, a interação espontânea entre pessoas é o principal motor da inovação urbana e dinamismo das cidades, nas quais a concentração de indivíduos, ideias e recursos cria um ambiente propício para a experimentação e para o surgimento de novas indústrias (Jacobs, 1969).

Mais tarde, os estudos de Edward Glaeser, consolidados em “O Triunfo das Cidades” (2011), ecoam muitas das ideias defendidas por Jacobs. Glaeser (2011) argumenta que as cidades são fundamentais para a inovação, o progresso econômico e a melhoria da qualidade de vida. Além disso, as cidades bem planejadas ofereceriam ganhos de escala significativos, reduzindo a dependência do automóvel e promovendo uma economia de baixo carbono. A partir de suas constatações, o autor defende políticas que estimulem a densificação urbana, destacando que cidades compactas podem reduzir a pegada ecológica enquanto aumentam a produtividade. Mas também discute problemas como desigualdade, moradia cara e congestionamento, admitindo-se a necessidade de políticas que melhorem a acessibilidade e incentivem a inovação no planejamento urbano.

Em linhas gerais, a literatura aponta que as características físicas das cidades, com suas diferentes formas, podem afetar desempenho econômico, social e ambiental das cidades. Algumas estão concentradas em torno de um núcleo central, outras possuem múltiplos centros

---

<sup>1</sup> Santos, 1993; Sposito 2015; Ojima, 2007.

e outras ainda se espalham por vastas áreas. Ahlfeldt *et al.* (2018) concluíram, a partir da análise de mais de 300 artigos acadêmicos, que 69% dos artigos revisados encontram efeitos positivos associados à forma urbana denominada compacta<sup>2</sup>. Densidade econômica (quantidade de pessoas que vivem ou trabalham em uma área), uso misto da terra e densidade do ambiente construído apresentam impactos positivos, em diferentes graus, para as cidades. Dentre as externalidades negativas e custos da maior densidade econômica estão fatores relacionados ao congestionamento, saúde e bem-estar. O aumento da compactação também pode contribuir para valores mais altos da terra e custos de moradia, fenômenos que a teoria urbana percebe como resultados das escolhas dos agentes.

Apesar dos resultados contundentes sumarizados por Ahlfeldt *et al.* (2018) em relação aos impactos positivos da compactação das cidades, os estudos sobre compactação concentram-se em cidades de países de alta renda, o que dificulta a avaliação dos impactos nos países de baixa e média renda<sup>3</sup>. A pertinência do tema é particularmente relevante para o Brasil, o qual é eminentemente urbano e apresenta todas as patologias modernas ligadas às cidades: poluição, crime, congestionamento, segregação, expansão descontrolada, perda do espaço público, serviços públicos deficientes (Mueller, 2015).

Um dos desafios do planejamento das cidades é a disponibilidade de ferramentas que permitam compreender e monitorar as dinâmicas urbanas de maneira integrada e eficiente. No Brasil, verifica-se ainda uma escassez de informações detalhadas sobre a configuração espacial das cidades brasileiras, o que limita a análise comparativa entre diferentes contextos e o monitoramento do impacto das políticas públicas. Esta pesquisa visa contribuir para o preenchimento dessa lacuna e para o entendimento da dinâmica urbana no Brasil, considerando a importância dos centros urbanos, sua complexidade e impacto no meio ambiente.

---

<sup>2</sup> Há diversas definições de cidades compactas. Para os autores, a compactidade apresenta basicamente três características: (i) densidade econômica, representada pelo número de pessoas que vivem ou trabalham em uma área; (ii) densidade morfológica, que seria a densidade do ambiente construído em termos de cobertura da superfície, construção e ruas; e (iii) uso misto da terra, relacionado ao grau de aproximação das unidades residenciais, vagas de emprego, comércio e lazer (Ahlfeldt *et al.*, 2018).

<sup>3</sup> Questões como a diferença de qualidade do transporte urbano podem fazer com que a compactação das cidades de países em desenvolvimento tenha mais efeitos negativos no acesso a empregos, serviços e comodidades do que nos países desenvolvidos.

## Estrutura da Tese

Esta tese reúne três artigos independentes, mas inter-relacionados, e investiga aspectos relacionados à forma urbana no Brasil e sua relação com as emissões de gases de efeito estufa (GEE).

O primeiro artigo analisa o impacto da densidade nas emissões de GEE, utilizando uma métrica de densidade urbana que relaciona a população à área da mancha urbana, excluindo grandes áreas rurais frequentemente consideradas em índices tradicionais de densidade demográfica. Análises de regressão em painel indicam que a densidade específica da área urbana tem um papel relevante na redução das emissões. Os resultados abrangem diversas escalas geográficas – 27 estados, 137 mesorregiões, 558 microrregiões e 4298 áreas mínimas comparáveis (AMC) – no período de 1991 a 2010, para o qual há informações disponíveis.

O segundo artigo cria uma base de dados com métricas espaciais para aprofundar o entendimento da forma urbana no Brasil. A análise vai além da densidade urbana, explorando aspectos espaciais da forma urbana, identificando diferenças regionais e avaliando mudanças ao longo do tempo. Os resultados serão utilizados no terceiro artigo para aprofundar a relação entre cidades e GEE. Mapas de uso e ocupação do solo foram utilizados para calcular métricas de paisagem e derivar indicadores para 187 concentrações urbanas médias e grandes em 1985, 1991, 2000, 2010, 2015 e 2022. Com o uso do pacote *landscapemetrics* no software R, foram gerados cinco indicadores principais: extensão urbana, complexidade dos fragmentos, complexidade dos limites urbanos, centralidade e compacidade.

Por fim, o terceiro artigo utiliza as métricas desenvolvidas no segundo para aprofundar a análise entre forma urbana e emissões de GEE apresentada no primeiro. Um indicador de dispersão urbana foi criado, integrando elementos como fragmentação, centralidade e compacidade. A partir disso, um modelo STIRPAT modificado foi aplicado a concentrações urbanas médias e grandes no Brasil, abrangendo o período de 1991 a 2010.

## 1. O impacto da densidade urbana nas emissões de gases de efeito estufa: evidências para o Brasil em múltiplas escalas com dados em painel

### 1.1. Introdução

Crescimento populacional e aquecimento global são dois grandes desafios da humanidade no século XXI. O aumento da população e a contínua urbanização resultam em cidades de dimensões ampliadas e, em diversas situações, com maior concentração demográfica. Historicamente, tais processos ocorrem em paralelo ao desenvolvimento econômico e ao aumento da renda, bem como ao surgimento de danos ambientais (Hilber; Palmer, 2014). Um efeito colateral importante da vida urbana para o meio ambiente é a poluição do ar. Entendida em seu sentido amplo, poluição do ar refere-se à “presença ou introdução no ar de uma substância que tem efeitos nocivos ou venenosos”<sup>4</sup> e inclui tanto as partículas como os gases. A exposição à poluição afeta a saúde<sup>5</sup>, o capital humano e a produtividade. Além disso, a qualidade do ar está intimamente ligada ao clima e aos ecossistemas da Terra em todo o mundo. Muitas das causas da poluição do ar também são fontes de emissões de gases de efeito estufa (GEE)<sup>6</sup>.

Este artigo tem como objetivo investigar a pressão exercida pelas cidades brasileiras sobre o meio ambiente com relação às emissões de gases de efeito estufa. As perguntas motivadoras são: Os modelos de cidades mais densas e compactas, defendidos contemporaneamente por organismos internacionais (LALL *et al.*, 2021), poderiam de fato contribuir para a redução das emissões de GEE no País? Qual a pressão exercida pelas cidades brasileiras sobre o meio ambiente? Em particular, como o processo de urbanização dos últimos anos tem impactado as emissões?

Neste contexto, o estudo pretende contribuir com o entendimento dos fatores que impactam emissões de gases de efeito estufa no contexto urbano, em particular, detalhar os aspectos demográficos e de densidade nas regiões urbanas brasileiras, considerando diferentes níveis de agregação espacial. Emprega-se um conjunto de dados em quatro estratificações

---

<sup>4</sup> Definição do dicionário de Oxford, atualmente utilizada pela maioria das instituições ambientais.

<sup>5</sup> World Health Organization (WHO) - <https://www.who.int/health-topics/air-pollution>

<sup>6</sup> Os Gases de Efeito Estufa (GEE) ou, em inglês, Greenhouse Gases (GHG) são substâncias gasosas presentes na atmosfera e que absorvem parte da radiação infravermelha emitida pelo Sol e refletida pela superfície terrestre, dificultando o escape desta radiação (calor) para o espaço. Os gases internacionalmente reconhecidos como gases de efeito estufa, regulados pelo Protocolo de Kioto, são: Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>), Metano (CH<sub>4</sub>), Óxido Nitroso (N<sub>2</sub>O), Hexafluoreto de Enxofre (SF<sub>6</sub>) e duas famílias de gases, Hidrofluorcarbono (HFC) e Perfluorcarbono (PFC).

geográficas – 27 estados, 137 mesorregiões, 558 microrregiões e 4298 áreas mínimas comparáveis (AMC's) para o período de 1991-2010. Uma análise de regressão em painel é conduzida para examinar a associação das emissões de gases de efeito estufa com aspectos socioeconômicos e fatores geográficos. Os resultados mostram que as emissões eminentemente urbanas estão associadas principalmente, mas não exclusivamente, à demografia. Os resultados sugerem que, dentre outros aspectos, o desenvolvimento urbano com maior densidade é um fator importante que favorece a redução das emissões urbanas.

É fato que, no Brasil, as cidades não são a principal fonte de emissões de gases de efeito estufa. De acordo com o Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG), historicamente cerca de 15% das emissões tiveram origem em setores urbanos (resíduos, processos industriais e energia), enquanto 85% resultam da mudança de uso da terra, florestas e agricultura<sup>7</sup>. Apesar disso, recentemente houve uma intensificação e a participação das emissões urbanas atingiu 28% do total em 2021.

Paralelamente, o Censo Demográfico Brasileiro indica que a população urbana passou de 36,2% em 1950 para 84,4% em 2010, com estimativas da ONU sugerindo 86,6% em 2018. Mesmo com possíveis superestimativas devido a questões metodológicas apontadas pelo IBGE<sup>8</sup>, as novas estimativas indicam uma urbanização de aproximadamente 76%. Ademais, nos últimos 20 anos, houve um crescimento significativo de centros urbanos de médio porte, refletindo a interiorização da urbanização no país, o que aumenta a complexidade da rede urbana além das grandes metrópoles<sup>9</sup>.

A rápida e intensa transformação territorial destaca a importância das questões urbanas para o desenvolvimento. Centros urbanos, descritos como a mais significativa criação da humanidade por Glaeser (2011), são reconhecidos como impulsionadores do desenvolvimento. No entanto, o "triunfo da cidade" pode ter consequências ambientais positivas ou negativas. O aumento populacional tende a elevar as emissões de poluentes, mas a distribuição geográfica das pessoas também muda, com mais pessoas morando em áreas urbanas de tamanhos e formatos variados. Mudanças na distribuição espacial da população e da atividade econômica influenciam a evolução das emissões per capita (Castells-Quintana; Dienesch; Krause, 2021). Contudo, as evidências sobre o papel da urbanização e densidade urbana na poluição são limitadas, especialmente no contexto brasileiro, uma lacuna que este artigo visa explorar.

---

<sup>7</sup> Média histórica contempla dados entre 1900 e 2015.

<sup>8</sup> <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/15003-ibge-propoe-debate-de-nova-classificacao-para-os-espacos-rurais-e-urbanos>

<sup>9</sup> Segundo dados da Pesquisa de Informações Básicas Municipais - Variáveis externas do IBGE

Avaliar a interação entre urbanização e meio ambiente, especialmente no contexto das mudanças climáticas globais, é crucial para a pesquisa em economia ambiental e urbana (Borck; Pflüger, 2019).

Mais especificamente, este artigo contribui para a literatura ao ser o primeiro a investigar o impacto do tamanho da população urbana e da densidade urbana nas emissões de gases de efeito estufa para as áreas urbanas brasileiras, com diferentes recortes geográficos. Especificamente, estima-se o impacto da densidade urbana sobre as emissões de GEE, em termos de elasticidade. Para tanto, o artigo está organizado em 6 seções, sendo essa primeira introdutória, seguida da seção 2 com a revisão da literatura. Na seção 3, detalham-se a estratégia empírica e as bases de dados utilizadas. Na seção 4, apresentam-se os resultados estimados para cada nível de agregação espacial, sendo a análise comparativa entre desagregações e as fontes de melhoria e limitações discutidas na seção 5. Por fim, a seção 6 traz as principais conclusões.

## **1.2. População, densidade e poluição: revisão da literatura**

A contaminação atmosférica é um desafio global significativo. Com o aumento da população mundial, prevê-se um acréscimo nas emissões de poluentes. Contudo, a relação entre crescimento demográfico e emissões não é necessariamente direta. A dinâmica das emissões por indivíduo e a conexão entre densidade populacional e emissões dependem de variáveis como níveis de prosperidade, tecnologias produtivas e padrões de demanda (Castells-Quintana; Dienesch; Krause, 2021).

Muitos estudos sobre os impactos das atividades humanas no meio ambiente baseiam-se na identidade IPAT, que postula que os impactos ambientais (I) são o produto do tamanho da população (P), níveis de prosperidade ou afluência (A) e tecnologia (T). A equação IPAT foi proposta por Holdren e Ehrlich (1974) e reformulada por Dietz e Rosa (1994) em um modelo chamado STIRPAT, permitindo testes empíricos e avaliação de efeitos não lineares das forças motrizes (York; Rosa; Dietz, 2003). Essa abordagem é amplamente utilizada para descrever o impacto antropogênico no meio ambiente, como demonstrado nos estudos de Cheng e Hu (2022), Castells-Quintana, Dienesch e Krause (2021), Li, Deng e Peng (2020), e Zhang e Lin (2012). A estrutura do modelo IPAT também tem sofrido modificações para identificar outros processos responsáveis pelo impacto ambiental.

A relação entre fatores demográficos e poluição do ar tem sido amplamente estudada a partir da utilização de dados agregados em nível nacional (Erlich *et al.*, 1971; Dietz; Rosa, 1997; Cole; Neumayer, 2004; Martínez-Zarzoso *et al.*, 2007). As evidências empíricas variam



conforme o resultado ambiental, as unidades de análise e a especificação do modelo. Em geral, a relação entre população e emissões em nível nacional é inconclusiva. Alguns estudos indicam que o consumo de energia, a poluição e as emissões de CO<sub>2</sub> aumentam proporcionalmente com a população (Cole; Neumayer, 2004; Bettencourt *et al.*, 2007; Jorgenson; Clark, 2010). Em contraste, outros sugerem um impacto negativo do crescimento populacional na poluição (Fragkias; Lobo, 2010). Além disso, há evidências de que as mudanças populacionais impactam mais as emissões em países em desenvolvimento do que nos países desenvolvidos (Shi, 2003; Martínez-Zarzoso *et al.*, 2007).

Já a relação entre riqueza e emissões é bastante explorada em estudos que investigam o papel do crescimento econômico e do desenvolvimento<sup>10</sup>, destacando-se a investigação da Curva Ambiental de Kuznets (EKC). Segundo essa teoria, a relação entre renda e emissões seguiria um padrão em U invertido, em que as emissões per capita aumentam nas fases iniciais do desenvolvimento, mas diminuem à medida que o desenvolvimento avança. Evidências empíricas sobre a EKC em nível nacional foram fornecidas por Schmalensee *et al.* (1998), Adreoni e Levinson (2001) e Kacprzyk e Kuchta (2020). No entanto, esses estudos apresentam resultados controversos e sensíveis à especificação do modelo e à variável de interesse (Dasgupta *et al.*, 2002). No contexto brasileiro, Polloni-Silva *et al.* (2021) utilizaram o modelo STIRPAT e dados dos 27 estados brasileiros para investigar a relação entre crescimento e emissões de CO<sub>2</sub> em diferentes estágios de desenvolvimento. Os resultados indicam que as emissões de CO<sub>2</sub> respondem significativamente a variações na população e no PIB per capita, com o consumo sendo um desafio central para as futuras emissões do Brasil. Além disso, a redução da importância econômica do setor industrial se reflete em coeficientes negativos ou insignificantes quando se analisa as emissões de CO<sub>2</sub> como variável dependente. O estudo também aponta para uma estagnação tecnológica no país, refletida no aumento da intensidade energética e das emissões de CO<sub>2</sub>.

Em se tratando das tentativas de capturar o efeito da tecnologia sobre o meio ambiente, é comum autores que consideram como *proxies*<sup>11</sup> para medi-la variáveis como a participação do setor industrial e de serviços no valor agregado das emissões ou do PIB (Sarzynski, 2012). Medidas agregadas de urbanização também são alternativas usadas para capturar os efeitos da modernização tecnológica. Duas teorias principais embasam essa segunda abordagem. A Teoria

---

<sup>10</sup> A maioria dos estudos empíricos utiliza como indicador de afluência o Produto Interno Bruto (PIB) *per capita*

<sup>11</sup> *Proxy*: indicador utilizado para medir indiretamente um conceito, fenômeno ou variável de interesse que, por alguma razão, não pode ser medido diretamente.

da Modernização Ecológica postula que a urbanização é uma transformação social inevitável que reflete a modernização (Gouldson; Murphy, 1997; Mol; Spaargaren, 2000). Assim, nos estágios iniciais de urbanização, haveria uma aceleração da transformação institucional, levando a mais emissões de CO<sub>2</sub>. À medida que a urbanização avança, gestores urbanos reduziram os riscos ambientais por meio da inovação tecnológica, transformação industrial e aglomeração urbana. Já a Teoria da Transição Ambiental Urbana sugere que, inicialmente, os impactos da urbanização na qualidade ambiental seriam negativos, devido à alta demanda por materiais como aço e cimento, que geram altas emissões de CO<sub>2</sub> (Xu *et al.*, 2016). Contudo, a urbanização poderia eliminar indústrias poluentes e promover tecnologias limpas, melhorando a eficiência energética e reduzindo as emissões de carbono (Li; Lin, 2015).

Pesquisas recentes que investigam os impactos populacionais e urbanos nas emissões entre países confirmam a literatura anterior, indicando a ausência de consenso sobre os resultados<sup>12</sup>. Nas últimas duas décadas, a análise no nível das cidades tem ganhado destaque para compreender a relação entre emissões e processos urbanos. Os determinantes das emissões em nível urbano podem ser semelhantes aos nacionais, com riqueza e tecnologia desempenhando um papel crucial. Contudo, as emissões também podem depender do tamanho, densidade e estrutura espacial da cidade (Kahn, 2006).

O tamanho ótimo das cidades e sua relação com a poluição é analisado por Borck e Tabuchi (2019) em um modelo teórico. Os autores argumentam que as emissões de GEE podem ser consideradas como globais, pois é um tipo de poluição que se espalha entre as cidades<sup>13</sup>. Os autores concluem que, quando a poluição é global e a poluição per capita diminui com o aumento da população, as cidades podem ser ineficientemente pequenas. Segundo os autores, com o aumento da poluição global em relação à local, os danos do aquecimento global crescem ao longo do tempo, justificando uma política que favoreça cidades maiores e mais densas.

A teoria da cidade compacta sugere três canais principais pelos quais a densidade urbana impactaria negativamente as emissões de gases. Primeiro, uma maior densidade urbana promove economias de aglomeração, aumentando a produtividade, reduzindo custos de transporte e otimizando recursos, diminuindo as emissões de poluentes (Ahlfeldt; Pietrostefani, 2019; Glaeser; Kahn, 2010). Segundo, áreas urbanas densas tendem a priorizar uso misto do

---

<sup>12</sup> Para um detalhamento dos diversos trabalhos sobre a temática ao longo dos últimos anos, ver Cheng e Hu (2022)

<sup>13</sup> Os autores diferem a poluição global da poluição local, sendo essa última mais associada a alguns tipos de emissões provenientes do tráfego. Exemplo de poluição local é aquela associada a materiais microparticulados. A poluição global, por não atingir uma área específica da cidade, não afeta as escolhas de localização dos indivíduos, hipótese importante para justificar as escolhas metodológicas ligadas às estimações.

solo e desenvolvimento compacto, reduzindo a expansão urbana e os custos de infraestrutura (Brueckner, 2000; OECD, 2012). Terceiro, a densidade urbana melhora o uso da infraestrutura existente, como transporte público e serviços, economizando custos e reduzindo emissões (Baum-Snow, 2007; Turner; Rawlings, 2010). Por outro lado, Duranton e Turner (2018) ponderam que a densidade influencia a decisão de dirigir – uma importante fonte de emissão de CO<sub>2</sub> – por vários canais: maior densidade reduz a distância das viagens, tornando destinos mais próximos, mas pode incentivar mais viagens e aumentar o custo unitário da viagem devido ao congestionamento. Neste sentido, maior densidade tenderia a reduzir as emissões de gases, mas o aumento no número de viagens poderia elevar as emissões.

#### 1.2.1. Evidências empíricas

Uma revisão sistemática da literatura foi realizada especificamente com o propósito de investigar os principais trabalhos empíricos cujo foco está na relação entre a forma urbana e a poluição, com particular interesse nas emissões de gases de efeito estufa e as medidas de urbanização e densidade urbana. Para realizar esta revisão sistemática foi utilizada como referência a metodologia denominada *Methodi Ordinatio* (Pagani; Kovalesski; Resende, 2015, 2017). Tal procedimento tem como principais vantagens a objetividade na organização das referências e a capacidade de utilização de múltiplos critérios para identificar a relevância de cada estudo, haja vista o número crescente de publicações encontradas nas principais bases bibliográficas.

A seleção preliminar, conduzida segundo tal metodologia, iniciou-se com um levantamento das características relacionadas à forma urbana e diferentes tipos de poluição. Foram utilizados dois filtros principais. O primeiro focou nas dimensões da forma urbana, selecionando artigos que abordam o tamanho das cidades, urbanização e/ou densidade urbana. O segundo filtro concentrou-se em tipos de poluição, priorizando artigos que analisam emissões de gases de efeito estufa, incluindo gases com características de poluição global, como CO<sub>2</sub> e NO<sub>2</sub>. Após essa fase, realizou-se uma análise criteriosa dos artigos, resultando na seleção dos trabalhos empíricos relevantes para a pesquisa. Durante a revisão das referências, outros artigos foram incorporados às referências, diante da relevância e pertinência avaliadas.

Depreende-se das referências selecionadas que são encontrados efeitos positivos e negativos da urbanização sobre as emissões de GEE, além de evidências também para relações de U invertido. No que diz respeito ao impacto da densidade urbana, há evidências um pouco mais contundentes (menos controversas) de que uma maior densidade estaria relacionada a menores níveis de emissões de GEE. A maioria dos artigos que analisa apenas o impacto da

densidade sobre o CO<sub>2</sub> também encontra uma relação negativa, embora haja algumas evidências em contrário. O Quadro 1-1 abaixo detalha os efeitos esperados por fonte bibliográfica.

**Quadro 1-1:** Impactos estimados empiricamente da urbanização e da densidade urbana sobre as emissões de gases de efeito estufa

| Tipo de poluição mensurada      | Direção dos impactos estimados por métrica |                        |
|---------------------------------|--------------------------------------------|------------------------|
|                                 | Urbanização <sup>1</sup>                   | Densidade populacional |
| Emissões de GEE                 | +/-                                        | -                      |
| CO <sub>2</sub> (gás carbônico) | +/- e U inv.                               | +/-                    |

*Nota:* +: positivo; -: negativo; +/-: foram encontrados os dois efeitos; U inv.: relação incerta, curva U invertido. As métricas são não exaustivas e restritas àqueles selecionados na literatura empírica para o foco da pesquisa. As Referências para cada célula avaliada são apresentadas na Tabela 1.A-9.

Fonte: Elaboração própria

Diversos estudos recentes com dados em nível urbano indicam que a urbanização pode aumentar as emissões (Cheng; Hu, 2022; Li; Deng; Peng, 2020; Liu; Li; Ding, 2021; Zhang; Lin, 2012a – focando em emissões residenciais). Outros estudos mostram efeitos negativos da urbanização sobre as emissões (Cheng *et al.*, 2022; Liu; Li; Ding, 2021 – para emissões per capita; Wang *et al.*, 2022). Além disso, há pesquisas que evidenciam uma relação incerta, descrita como uma curva em U invertido (Guo *et al.*, 2019), e estudos que não encontram uma influência significativa (Sadorsky, 2014 – para economias emergentes). As discussões então se ampliam para considerar que os impactos ambientais do desenvolvimento urbano não são bem capturados por uma medida tão simplificada como a taxa de urbanização, já que diferentes formas de urbanização podem ter efeitos variados no meio ambiente local e global (Setp; Sánchez-Rodríguez; Fragkias, 2010).

A literatura empírica sobre a relação entre densidade urbana e emissões a nível de cidade é ainda limitada e apresenta resultados variados (Ahlfeldt; Pietrostefani, 2019). No entanto, estudos que investigam o impacto do desenvolvimento urbano nas emissões de gases de efeito estufa, especialmente CO<sub>2</sub>, mostram que alta densidade e desenvolvimento urbano compacto tendem a aumentar a eficiência energética e reduzem as emissões de carbono. Hilber e Palmer (2014), em uma análise de 75 cidades globais com dados de 2005 a 2011, sugerem que a densidade contribui para a redução das emissões de dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>). Castells-Quintana, Dienesch e Krause (2021), utilizando dados de mais de 1200 cidades e 190 países, constatam que cidades mais densas apresentam menores emissões per capita, tanto em nível urbano quanto nacional. Eles também destacam que a estrutura espacial da cidade influencia essas emissões, com a policentralidade associada a menores emissões em áreas urbanas maiores e a monocentralidade beneficiando cidades menores.

Adicionalmente, em estudo com 66 cidades dos EUA, Glaeser e Kahn (2010) mostram que a densidade reduz as emissões de CO<sub>2</sub>. Lee e Lee (2014) revelam que dobrar a densidade ponderada pela população nos EUA está associado a uma redução de 48% nas emissões de CO<sub>2</sub> de viagens domésticas e 35% no consumo de energia residencial. Resultados semelhantes são encontrados por Gudipudi *et al.* (2016). Em contraste, Duranton e Turner (2018) indicam que a densidade urbana tem um efeito pequeno sobre a quantidade de viagens realizadas, com um aumento de 10% na densidade resultando em uma redução de 0,7% a 1% na condução, mantendo as demais variáveis constantes. Por fim, nota-se que, recentemente, a pesquisa sobre a relação entre emissões de poluentes e urbanização na China tem se expandido consideravelmente. Guo *et al.* (2022) mostram que um aumento de 1% na densidade urbana pode reduzir as emissões per capita em 0,039% no País. YI *et al.* (2021), analisando 108 cidades chinesas entre 2003 e 2018, encontram uma correlação negativa significativa entre densidade urbana e emissões de CO<sub>2</sub>. O efeito encontrado é não linear, sendo mais pronunciado em cidades de médio porte e menores em megacidades com população superior a 5 milhões, onde a redução das emissões não é significativa.

Ainda falta na literatura uma análise focada na relação entre densidade e emissões usando um conjunto abrangente de dados para cidades brasileiras, lacuna que este estudo pretende preencher. A utilização dos dados referentes às cidades em diferentes regiões do País e tamanhos distintos de população local permite compreender e detalhar melhor o papel da distribuição espacial da população e da atividade econômica na evolução das emissões de GEE.

### 1.3. Estratégia empírica

O quadro conceitual que está por trás da análise desenvolvida neste trabalho refere-se a um modelo básico de economia urbana desenvolvido por Borck e Tabuchi (2019), o qual estuda tamanhos ótimos e de equilíbrio de cidades em um modelo de sistema de cidades com poluição<sup>14</sup>. A análise estuda a poluição no contexto urbano, diferenciando-a entre local e global, e os resultados encontrados dependem particularmente da relação entre a poluição com a população e também com a densidade populacional da cidade. Estimar tais relações (elasticidades) é o objetivo central deste trabalho.

Para tanto, fundamenta-se a análise empírica na estrutura que explica a dinâmica da poluição por meio do modelo IPAT modificado, amplamente utilizado em estudos empíricos que analisam impactos ambientais, conforme ressaltado na revisão de literatura. Para efeitos de

---

<sup>14</sup> O detalhamento deste modelo encontra-se no apêndice 1.B.

notação, o  $I$  da equação será denominado  $e(n)$ , o qual representa as emissões totais de cada cidade, e  $P$  será identificado por  $n$ , de tal forma que a relação *IPAT* pode ser reescrita em seu modo estocástico como  $e(n) = n^\theta A^\varphi T^\mu$ . Adicionalmente, a fim de explorar diretamente as questões urbanas, este trabalho estima uma versão modificada do modelo *STIRPAT*, em que é incorporada também a variável densidade, resultando na seguinte especificação versão estocástica, em termos logaritmos:

$$\log(e_{it}) = \alpha + \theta \log(n_{it}) + \gamma \log(d_{it}) + \varphi \log(A_{it}) + \mu \log(T_{it}) + \varepsilon_{it} \quad (5)$$

em que o índice  $i$  refere-se à unidade de observação (manchas urbanas em diferentes níveis de agregação), no período de tempo  $t$  e  $\varepsilon$  é um choque idiossincrático. A variável  $e_{it}$  representa as emissões urbanas de GEE,  $n_{it}$  a população,  $d_{it}$  a densidade urbana,  $A_{it}$  o PIB per capita e  $T_{it}$  a tecnologia, cujas *proxies* testadas são a participação da indústria no PIB ou a urbanização. A inclusão da variável densidade urbana na equação é realizada em diferentes trabalhos empíricos, inclusive em Borck e Tabuchi (2019)<sup>15</sup>.

Nas estimativas, foram considerados os efeitos fixos de cidade/mancha urbana, para controlar características idiossincráticas invariantes no tempo, como localização geográfica<sup>16</sup>. Além disso, os coeficientes na especificação log-log fornecem as elasticidades. Os coeficientes para  $\varphi$  irão capturar a relação fluência-emissões (e uma curva potencial de Kuznets se o quadrado da renda per capita for incluído), enquanto os coeficientes para  $\theta$  representam a elasticidade das emissões em relação à população,  $\gamma$  a elasticidade da densidade e  $\mu$  da tecnologia.

### 1.3.1. Dados e estatísticas descritivas

Com o propósito de avaliar os resultados das estimativas de emissões de GEE em múltiplas escalas geográficas utilizando modelos em painel, adotou-se a estrutura geográfica definida pelo IBGE, para municípios, microrregiões, mesorregiões e Unidades da Federação (UF). A unidade de maior desagregação para a qual seria possível obter informações econômicas e demográficas de forma sistemática no tempo e que abranja todo o território brasileiro é o município (Reis *et al.*, 2008). A utilização das informações municipais traz, no entanto, inconsistências para análises intertemporais, diante das intensas modificações

<sup>15</sup> Os autores utilizam a especificação  $e_{it} = Bn_{it}^\theta$  e sua versão logarítmica para estimar a elasticidade das emissões em relação à população, utilizando o controle por efeitos fixos individuais e temporais, bem como por divisões territoriais, para lidar com fatores que podem afetar tanto o tamanho populacional quanto as emissões (ciclos de negócios, estrutura industrial, clima, etc.). Eles também estimam especificações adicionais em que a variável densidade é incluída juntamente com a população.

<sup>16</sup> Efeitos fixos de tempo foram testados, porém não se mostraram significantes

ocorridas na definição dos municípios, tais como desmembramentos e unificações. Segundo o IBGE (2011), o número de municípios no Brasil aumenta 4491 em 1991 para 5507 no Censo de 2000 e 5565 em 2010.

Para que seja plausível realizar análises regionais que considerem diferentes períodos, foram realizadas agregações dos municípios nas denominadas áreas mínimas comparáveis (AMC), as quais apresentam são consistentes no tempo (Reis *et al.*, 2008). Este trabalho utiliza a metodologia proposta e disponibilizada por Ehrl (2017), que possibilita a criação de AMC para qualquer subperíodo arbitrário entre dois anos censitários dos censos entre 1872 e 2010<sup>17</sup>. Assim, quatro estratificações geográficas são consideradas na base de dados – 27 estados, 137 mesorregiões, 558 microrregiões e 4298 áreas mínimas comparáveis (AMC's) para o período de 1991-2010. Os dados são obtidos a partir do nível da AMC, que é a unidade espacial mais desagregada no presente trabalho, e, em seguida, agrupados de modo a formar as outras escalas espaciais.

Os dados de emissões de GEE foram obtidos a partir da base de dados do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG). O sistema é uma iniciativa do Observatório do Clima que compreende a produção de estimativas anuais das emissões de GEE no Brasil, com base nas diretrizes do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) e na metodologia dos Inventários Brasileiros de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases do Efeito Estufa, elaborado pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI)<sup>18</sup>. A base municipal consultada refere-se à Coleção 11, divulgada em fevereiro de 2024 em bases municipais. São disponibilizadas as séries históricas das emissões de 1990 a 2022 dos gases de efeito estufa contidos no inventário nacional como CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O e os HFC's, medidas em carbono equivalente (CO<sub>2</sub>e (t)) na métrica GWP (potencial de aquecimento global) e segundo os fatores de conversão estabelecidos no 5º relatório do IPCC (AR5)<sup>19</sup>.

Nos relatórios do SEEG, cinco setores são discriminados como fontes de emissões: Agropecuária, Energia, Mudanças de Uso da Terra, Processos Industriais e Resíduos. Este artigo computa as emissões dos três mais diretamente relacionados a emissões urbanas, a saber,

---

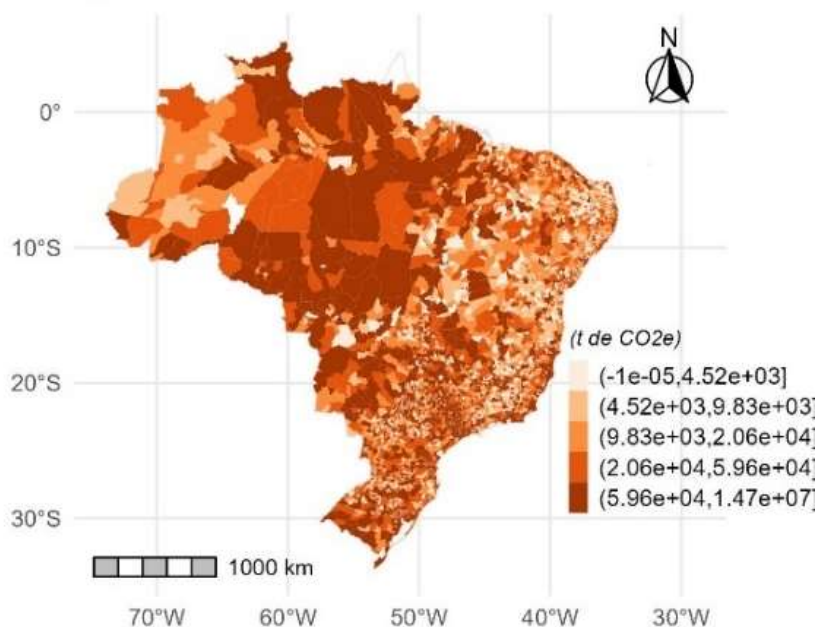
<sup>17</sup> Foi utilizado pacote 'geobr' para acessar o conjunto de dados espaciais oficiais do Brasil (<https://CRAN.R-project.org/package=geobr>). O banco de dados baseia-se no código para o software Stata desenvolvido por Philipp Ehrl e disponível em <https://sites.google.com/site/philippehrl/research>.

<sup>18</sup> Os dados originais do SEEG são obtidos de relatórios governamentais, institutos, centros de pesquisa, entidades setoriais e organizações não governamentais.

<sup>19</sup> GWP AR5 é o fator de conversão mais recente e atualizado (e também o fator utilizado na NDC brasileira).

Energia, Processos Industriais e Resíduos. As estimativas de emissões por município, divulgadas desde 2021 pelo SEEG, são realizadas, preponderantemente, por meio de alocações das emissões a partir de cada Unidade da Federação para os municípios brasileiros. Os dados municipais são obtidos por meio da alocação das emissões de cada Unidade da Federação nos Municípios<sup>20</sup>. O SEEG estima que pouco mais de 90% das emissões nacionais foram alocadas nos municípios brasileiros, tendo como principais desafios de alocação as emissões ligadas a processos industriais, devido à dificuldade de acesso aos dados de atividade no nível municipal. No Mapa 1-1, observa-se a distribuição das emissões urbanas de GEE no território brasileiro por AMC's com dados referentes a 2010.

**Mapa 1-1:** Emissões Urbanas de Gases de Efeito Estufa brutas em 2010 por AMC



Fonte: SEEG - Observatório do Clima (Elaboração própria)

Já os dados de população total e de população urbana são do Censo Demográfico do IBGE para 1991, 2000 e 2010. A população urbana no Brasil ultrapassou 160 milhões de habitantes no País em 2010, com um crescimento de 45% em relação a 1991. Diante de um aumento de 29,9% na população total, observou-se uma expansão da urbanização, medida pela razão entre população urbana e população total, de 75,6% para 84,4% no período.

<sup>20</sup> A alocação por município é com base em dados específicos dos setores, sempre que disponível. Como exemplo, no caso das emissões provenientes do transporte rodoviário, o SEEG utiliza informações como a frota veicular municipal, provenientes do Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN) sobre o número de veículos registrados por tipo (carros, caminhões, motocicletas), bem como estatísticas de vendas de gasolina, diesel e etanol por município disponibilizadas pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), dentre outros.



De forma complementar aos dados de população urbana e urbanização, foi criada também uma variável identificadora (*dummy*<sup>21</sup>) que aponta quais AMC's pertencem a concentrações urbanas. Segundo a definição de unidade territorial do IBGE, as concentrações urbanas são compostas por municípios isolados ou arranjos populacionais com mais de 100 mil habitantes. Os arranjos populacionais, por sua vez, são definidos por conjuntos de municípios com integração significativa<sup>22</sup>. Adicionalmente, *dummies* foram criadas para distinguir identificar as cinco grandes regiões geográficas (Centro-Oeste, Norte, Nordeste, Sudeste, Sul).

Para o PIB, foram utilizadas as bases de dados do IPEADATA com séries históricas do PIB concatenado<sup>23</sup>. O modelo pode incluir também o termo quadrático para o PIB per capita. As participações do PIB industrial foram calculadas como a razão entre o PIB industrial e o PIB total. O PIB per capita refere-se à razão entre o PIB total<sup>24</sup> e a população total. Coeficiente positivo e significativo para o PIB per capita combinados com coeficiente negativo e significativo para o termo quadrático forneceriam evidências de efeitos não constantes da riqueza, conforme a hipótese do EKC.

A variável de densidade populacional urbana requer atenção especial nesta análise. Em geral, a densidade é definida como a população dividida pela área da extensão territorial em análise. Um problema central envolvido na medição dos atributos da estrutura espacial urbana diz respeito a uma definição precisa e consistente do que constitui a área da cidade. A utilização da área administrativa é tipicamente inadequada, tanto porque pode ser alterada de um dia para o outro por decreto, como porque pode incluir grandes áreas rurais.

Para acessar uma medida mais fidedigna de densidade urbana, este trabalho utiliza, de um lado, a população urbana por município obtida pelo IBGE por meio do Censo Demográfico,

---

<sup>21</sup> Variável binária que assume valor um (1) se unidade pertence ao grupo em questão e valor zero (0) caso contrário.

<sup>22</sup> As definições do IBGE (2016) para tais unidades são as seguintes.

Arranjos Populacionais: unidades territoriais compostas por mais de um município, que apresentam integração significativa em razão da contiguidade das áreas urbanizadas ou da presença de deslocamentos frequentes dos habitantes para trabalhar ou estudar.

Municípios Isolados: municípios que não participam de Arranjo Populacional.

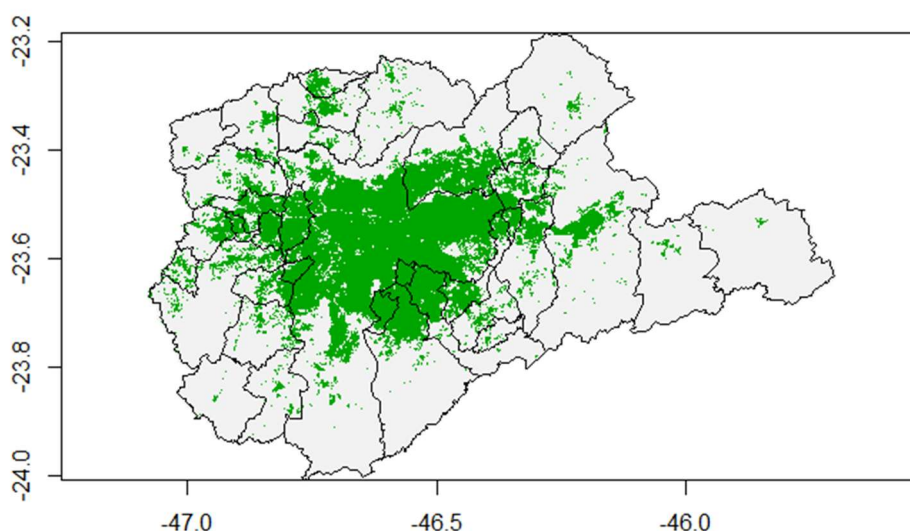
Concentrações Urbanas: arranjos populacionais ou municípios isolados que tenham mais de 100 mil habitantes.

<sup>23</sup> As séries foram compatibilizadas de 1920 a 2001, concatenando-se as informações a partir da taxa de variação anual do PIB com metodologia 2002 a 2019. Adicionalmente, foram realizadas estimativas para o PIB municipal de 1991, utilizando a tendência de crescimento do PIB dos municípios entre 1985-1996, diante da falta de informação mais precisa.

<sup>24</sup> Medido por meio da média móvel de 3 anos do indicador original, centralizado no ano de referência do Censo Demográfico, com vistas a suavizar possíveis oscilações de curto prazo, especialmente ligadas à dinâmica dos ciclos econômicos.

e de outro, estimativas de área urbana obtidas pelo Mapbiomas<sup>25</sup>. São utilizados dados referentes à coleção 8.0, divulgada em 2023, com dados históricos desde 1985 referentes à infraestrutura urbana<sup>26</sup>. Abaixo, o Mapa 1-2 traz um exemplo da diferenciação entre a área total da concentração urbana de São Paulo (em cinza) e área urbana identificada pelo Mapbiomas (verde). Com isto, a densidade urbana é calculada para cada município como a população urbana dividida por hectares de área de terra referentes a infraestrutura urbana.

**Mapa 1-2:** Concentração urbana de São Paulo com limites administrativos municipais e área urbanizada correspondente



Fonte: Elaboração própria com base em Mapbiomas e IBGE

Na Tabela 1-1 são apresentadas estatísticas descritivas para cada um dos três períodos de tempo em AMC's<sup>27</sup>. A média das emissões urbanas de GEE aumenta gradualmente entre 1991 e 2010. A população total média cresce em 30% durante o período, enquanto a população urbana aumenta 45%. Como resultado, observa-se um aumento de 13 pontos percentuais na urbanização média das AMC's entre 1991 e 2010. Além disso, foi observado um aumento na área urbana média das AMC's (84% no período) durante o processo de urbanização. Portanto, embora a população urbana tenha crescido, a área urbana aumentou de forma mais significativa, tendo resultado em uma queda na densidade urbana média. Essas informações dão indícios de um processo de urbanização disperso (espraiado) nas cidades brasileiras.

<sup>25</sup> O Projeto MapBiomas é uma iniciativa multi-institucional que visa gerar mapas anuais de cobertura e uso do solo a partir de processos de classificação automática aplicada a imagens de satélite. Os mapas são produzidos a partir da classificação pixel a pixel de imagens dos satélites Landsat. Todo processo é feito com extensivos algoritmos de aprendizagem de máquina (machine learning) através da plataforma Google Earth Engine que oferece imensa capacidade de processamento na nuvem.

<sup>26</sup> Nível 2 de desagregação na metodologia do Mapbiomas

<sup>27</sup> Matriz de correlação disponível na Tabela 1.C-1 do apêndice.

**Tabela 1-1:** Estatísticas descritivas para todas as AMC's nos períodos disponíveis – Brasil e Grandes Regiões

| Ano  | Variável                           | Descrição                                                                                                                     | Média     | DV         | Mín.   | Max.          |
|------|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|------------|--------|---------------|
| 1991 | Emissões Urbanas de GEE            | GEE dos setores de Energia, Industriais e Resíduos em toneladas de gás carbônico equivalente (t de CO <sub>2</sub> e GWP-AR5) | 8.249,83  | 57.429,82  | 0,00   | 2.224.263,00  |
|      | Emissões Urbanas de GEE per capita | Razão entre GEE urbano e população total (tCO <sub>2</sub> e/hab)                                                             | 0,22      | 0,49       | 0,00   | 21,95         |
|      | População Total                    | Número de pessoas que residem nas AMC's                                                                                       | 34.324,55 | 192.923,10 | 751,00 | 9.646.185,00  |
|      | População Urbana                   | Número de pessoas que residem nos setores censitários urbanos das AMC's                                                       | 25.984,60 | 188.651,90 | 254,00 | 9.412.894,00  |
|      | Urbanização                        | Razão entre número de habitantes em áreas urbanas e total de habitantes (%)                                                   | 0,54      | 0,23       | 0,02   | 1,00          |
|      | Área Urbana                        | Área urbanizada (hectares - ha)                                                                                               | 386,81    | 1.704,31   | 0,17   | 71.858,90     |
|      | Densidade Urbana                   | Razão entre a população urbana e a área urbanizada (pessoas/hectare)                                                          | 107,63    | 178,87     | 1,52   | 4.073,20      |
|      | PIB per capita                     | Razão entre PIB a preços de mercado de 2010 e população (R\$ mil/pessoas)                                                     | 8,65      | 13,38      | 0,00   | 414,83        |
| 2000 | Emissões Urbanas de GEE            | GEE dos setores de Energia, Industriais e Resíduos em toneladas de gás carbônico equivalente (t de CO <sub>2</sub> e GWP-AR5) | 14.871,04 | 105.744,20 | 0,00   | 3.647.778,00  |
|      | Emissões Urbanas de GEE per capita | Razão entre GEE urbano e população total (tCO <sub>2</sub> e/hab)                                                             | 0,31      | 1,15       | 0,00   | 52,27         |
|      | População Total                    | Número de pessoas que residem nas AMC's                                                                                       | 39.710,07 | 213.259,70 | 795,00 | 10.434.252,00 |
|      | População Urbana                   | Número de pessoas que residem nos setores censitários urbanos das AMC's                                                       | 32.293,40 | 205.313,80 | 362,00 | 9.813.187,00  |
|      | Urbanização                        | Razão entre número de habitantes em áreas urbanas e total de habitantes (%)                                                   | 0,62      | 0,22       | 0,05   | 1,00          |
|      | Área Urbana                        | Área urbanizada (hectares - ha)                                                                                               | 582,97    | 2.186,73   | 1,76   | 82.085,02     |
|      | Densidade Urbana                   | Razão entre a população urbana e a área urbanizada (pessoas/hectare)                                                          | 62,40     | 50,49      | 3,24   | 753,88        |
|      | PIB per capita                     | Razão entre PIB a preços de mercado de 2010 e população (R\$ mil/pessoas)                                                     | 9,15      | 9,98       | 0,88   | 228,33        |
| 2010 | Emissões Urbanas de GEE            | GEE dos setores de Energia, Industriais e Resíduos em toneladas de gás carbônico equivalente (t de CO <sub>2</sub> e GWP-AR5) | 83.009,09 | 420.118,50 | 0,00   | 14.582.403,00 |
|      | Emissões Urbanas de GEE per capita | Razão entre GEE urbano e população total (tCO <sub>2</sub> e/hab)                                                             | 1,69      | 4,17       | 0,00   | 162,00        |
|      | População Total                    | Número de pessoas que residem nas AMC's                                                                                       | 44.612,71 | 233.473,30 | 805,00 | 11.253.503,00 |
|      | População Urbana                   | Número de pessoas que residem nos setores censitários urbanos das AMC's                                                       | 37.666,30 | 231.273,30 | 427,00 | 11.152.344,00 |
|      | Urbanização                        | Razão entre número de habitantes em áreas urbanas e total de habitantes (%)                                                   | 0,67      | 0,20       | 0,04   | 1,00          |
|      | Área Urbana                        | Área urbanizada (hectares - ha)                                                                                               | 712,57    | 2.439,71   | 0,80   | 84.419,77     |
|      | Densidade Urbana                   | Razão entre a população urbana e a área urbanizada (pessoas/hectare)                                                          | 52,86     | 40,40      | 4,53   | 1.544,65      |
|      | PIB per capita                     | Razão entre PIB a preços de mercado de 2010 e população (R\$ mil/pessoas)                                                     | 12,61     | 13,47      | 2,41   | 347,01        |

*Nota: O número de observações por ano referentes às AMC's é de 4268. DV= Desvio-Padrão*

Fonte: Elaboração própria

#### 1.4. Resultados

A conexão entre densidade urbana e emissões urbanas de GEE ao nível das cidades (AMC's) é explorada econometricamente com base em um painel de 4.268 AMC's em 3 anos, totalizando 12.804 observações. Na Tabela 1-2 são apresentados os resultados das estimativas

em um painel balanceado. Na coluna 1 são apresentadas as estimações utilizando-se o método de mínimos quadrados ordinários agrupados (POLS) com erros-padrões robustos à autocorrelação serial. Contudo, como as cidades ainda podem variar em fatores não observados que influenciam tanto as emissões quanto as covariadas (população, densidade, PIB per capita e participação da indústria no PIB).

Para reduzir possíveis vieses, foram incluídos efeitos fixos à regressão principal. A coluna 2 traz os resultados estimados por efeitos fixos por AMC (*within*), para controlar por fatores não variantes no tempo específicos de cada indivíduos. Assim, fatores intrínsecos às cidades (AMC's) que possuem pouca ou nenhuma alteração ao longo das três décadas de análise são controlados, tais como características geológicas, clima e estrutura etária. Nas colunas 3, é realizado controle para efeitos aleatórios da cidade, cuja hipótese é de que os eventuais fatores não-observados existentes não são correlacionados com as variáveis explicativas.

Ao se aplicar o teste de Hausman para a diferença conjunta dos coeficientes entre modelo de efeitos fixos e efeitos aleatórios, obtém-se estatística *qui-quadrado* de 5375.8,  $p\text{-value} < 2.2\text{e-}16$ , sugerindo que os estimadores são diferentes. Como o modelo de efeitos fixos é sempre consistente, mas pode ser ineficiente, ele mostra-se mais adequado do que o modelo de efeitos aleatórios neste caso. Embora o modelo RE (efeitos aleatórios) tenha menor variância do que o EF (mais eficiente), ele pode trazer estimativas enviesadas.

**Tabela 1-2:** Principais estimações no nível das AMC's

|                                 | <i>Variável dependente: Emissões urbanas de GEE<sup>a</sup></i> |                      |                      |                      |                      |
|---------------------------------|-----------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|                                 | (1)                                                             | (2)                  | (3)                  | (4)                  | (5)                  |
| População <sup>a</sup>          | 0,982***<br>(0,007)                                             | 3,059***<br>(0,074)  | 0,982***<br>(0,007)  | 2,817***<br>(0,067)  | 2,745***<br>(0,070)  |
| Densidade Urbana <sup>a</sup>   | -0,327**<br>(0,017)                                             | -1,224***<br>(0,143) | -0,327***<br>(0,017) | -1,058***<br>(0,136) | -0,859***<br>(0,168) |
| PIB per capita <sup>a</sup>     | 0,566***<br>(0,016)                                             | 0,535***<br>(0,027)  | 0,566***<br>(0,016)  | 0,373***<br>(0,023)  | -0,412***<br>(0,073) |
| PIB pc quadrático <sup>a</sup>  |                                                                 |                      |                      |                      | 0,225***<br>(0,025)  |
| Partic. PIB industrial          | 0,412***<br>(0,048)                                             | 0,878***<br>(0,086)  | 0,412***<br>(0,048)  |                      |                      |
| Urbanização                     |                                                                 |                      |                      | 4,624***<br>(0,131)  | 4,804***<br>(0,134)  |
| Dens. <sup>a</sup> x Conc. Urb. | -0,035***<br>(0,006)                                            | 0,360***<br>(0,088)  | -0,035***<br>(0,006) | 0,083<br>(0,084)     | 0,134<br>(0,084)     |
| Dens. <sup>a</sup> x NE         | 0,040***<br>(0,011)                                             | 0,584***<br>(0,147)  | 0,040***<br>(0,011)  | 0,617***<br>(0,138)  | 0,567**<br>(0,136)   |
| Densidade <sup>a</sup> x N      | 0,063***<br>(0,013)                                             | 0,640***<br>(0,228)  | 0,063***<br>(0,013)  | 0,131<br>(0,229)     | 0,190<br>(0,218)     |
| Densidade <sup>a</sup> x SE     | 0,076***<br>(0,010)                                             | 0,404***<br>(0,148)  | 0,076***<br>(0,010)  | 0,645***<br>(0,138)  | 0,682***<br>(0,135)  |
| Densidade <sup>a</sup> x S      | 0,004<br>(0,011)                                                | 0,112<br>(0,168)     | 0,004<br>(0,011)     | 0,447***<br>(0,150)  | 0,450***<br>(0,146)  |
| Constante                       | -0,952***<br>(0,081)                                            |                      | -0,952***<br>(0,081) |                      |                      |
| Efeitos Individuais             | Não                                                             | EF                   | EA                   | EF                   | EF                   |
| Observações                     | 12.804                                                          | 12.804               | 12.804               | 12.804               | 12.804               |
| R <sup>2</sup>                  | 0,729                                                           | 0,522                | 0,729                | 0,599                | 0,622                |
| R <sup>2</sup> Ajustado         | 0,728                                                           | 0,282                | 0,728                | 0,398                | 0,432                |

Erros-padrão robusto entre parênteses e \*p<0,1; \*\*p<0,05; \*\*\*p<0,01  
qui-quadrado de 5375,8, p-value < 2.2e-16

Notas:

<sup>a</sup>Variáveis em termos logarítmicos

EF: Efeitos Fixos/ EA: Efeitos Aleatórios

Fonte: Elaboração própria

As colunas 1, 2 e 3 evidenciam que as emissões urbanas crescem à medida que as cidades aumentam em população, riqueza e participação da indústria<sup>28</sup>. Com relação à densidade, seu coeficiente negativo e significativo sugere que cidades mais densas exibem menos emissões urbanas de GEE, em média. A magnitude desse impacto, porém, varia a depender de outras características, como pertencimento a concentrações urbanas e região geográfica.

<sup>28</sup> Variável medida no nível e não em termos logarítmicos.

O coeficiente relacionado à densidade urbana é de -1,224, indicando que 1% a mais na densidade urbana reduz em 1,224% o nível de emissões urbanas de GEE. A estimativa é significativa a 1% considerando os erros-padrão robustos à autocorrelação serial. Porém esse impacto é menor para AMC's que pertencem a concentrações urbanas. Ou seja, áreas urbanas com mais de 100 mil habitantes tendem a apresentar menor impacto da densidade sobre as emissões (coeficiente conjunto de -0,864).

Adicionalmente, AMC's pertencentes às regiões Nordeste, Norte e Sudeste também atenuam a sensibilidade das emissões à densidade urbana (comparativamente a estar no Centro-Oeste). Para as AMC's do Nordeste, o impacto da densidade nas emissões é de -0,64; do Norte -0,58; e do Sudeste -0,82. Pertencer ao Sul não apresenta diferença estatisticamente significativa no impacto da densidade em relação ao Centro-Oeste<sup>29</sup>.

A coluna 4 utiliza a variável industrialização como *proxy* de tecnologia, alternativamente à participação industrial no PIB<sup>30</sup>. Comparativamente ao modelo 3, observa-se ligeira redução na sensibilidade das emissões à população, à densidade e ao PIB per capita, mas ainda mantendo-se os sinais e significâncias. Já o controle relacionado às concentrações urbanas deixa de ser significativo com a variável urbanização, assim como a variável identificadora de pertencimento ao Norte, passando a ser significativa a diferenciação quanto às AMC's do Sul. Por fim, a coluna 6 testa para a presença do termo quadrático do PIB, que mostra significância estatística, sugerindo uma relação de U-invertido entre a riqueza e as emissões das cidades brasileiras. É interessante notar que, neste caso, a elasticidade da densidade cai para 0,859%, sem diferenciação entre pertencentes ou não a concentrações urbanas<sup>31</sup>.

#### 1.4.1. Resultados no nível das microrregiões, mesorregiões e Unidades da Federação

Especificações semelhantes à utilizada no nível das AMC's são estimadas para outros três níveis de agregação – microrregiões, mesorregiões e Unidades da Federação – e apresentadas na Tabela 1-3 com as estimativas de efeitos fixos e aleatórios. No total, o país é dividido em 558 microrregiões, das quais 555 estão presentes no painel balanceado, totalizando 1665 observações (555 observações em três períodos de tempo). Já no que se refere às

<sup>29</sup> As elasticidades mencionadas referem-se à soma dos coeficientes da variável densidade com aqueles estimados a partir da interação entre a densidade e a dummy de cada região, respectivamente.

<sup>30</sup> Pesquisadores apontam a urbanização como um indicativo de modernização tecnológica, associando seu crescimento ao avanço de tecnologias e instituições. Estudos mostram que maiores taxas de urbanização influenciam positivamente fatores como consumo de energia, emissões de CO<sub>2</sub>, pegada ecológica e poluição da água (Cole e Neumayer, 2004; Jorgenson e Clark, 2011; Parikh e Shukla, 1995; Torras e Boyce, 1998; York et al., 2003).

<sup>31</sup> Testes com outras especificações por AMC estão disponíveis na Tabela 1.C-4 do apêndice.

mesorregiões, todas as 137 existentes foram incluídas no painel balanceado, totalizando 411 observações. De forma semelhante, as 27 Unidades da Federação existentes foram incluídas no painel balanceado, totalizando 81 observações. Pelo teste de Hausman, o modelo com efeitos fixos mostra-se adequada para todos os níveis de agregação<sup>32</sup>.

As colunas 1 e 2 da Tabela 1-3 apresentam os resultados das estimativas para microrregiões. Em relação à densidade, o coeficiente negativo e significativo sugere que microrregiões mais densas tendem a exibir menos emissões urbanas de GEE, em média. O coeficiente relacionado à densidade urbana é de -1,27, indicando que 1% a mais na densidade urbana reduz em 1,27% o nível de emissões urbanas de GEE. A estimativa é significativa a 1% considerando os erros-padrão robustos à autocorrelação serial. Esse impacto não é sensível a concentrações urbanas nem há diferenciação estatisticamente significativa por grande região geográfica.

As colunas 3 e 4 trazem os resultados das estimativas para as mesorregiões. O coeficiente relacionado à densidade urbana é de -1,724, indicando que 1% a mais na densidade urbana reduz em 1,724% o nível de emissões urbanas de GEE para mesorregiões. A estimativa é significativa a 1% considerando os erros-padrão robustos à autocorrelação serial. Esse impacto é sensível a concentrações urbanas a 10%, sugerindo que mesorregiões pertencentes a concentrações urbanas têm impacto global de -0.862 da densidade das emissões. Não há efeitos significativos na diferenciação por grande região geográfica.

Por fim, os resultados das estimativas por UF são apresentados nas colunas 5 e 6. O coeficiente relacionado à densidade urbana é de -0,804, indicando que 1% a mais na densidade urbana reduz em 0,804% o nível de emissões urbanas de GEE para UF's.

---

<sup>32</sup> O teste de Hausman apresenta p-valor < 2.2e-16 nos três casos.

**Tabela 1-3:** Principais resultados das estimações no nível das microrregiões, mesorregiões e Unidades da Federação

| <i>Variável Dependente: Emissões urbanas de GEE<sup>a</sup></i> |                     |                      |                      |                      |                     |                     |
|-----------------------------------------------------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|---------------------|
|                                                                 | Microrregiões       |                      | Mesorregiões         |                      | UF                  |                     |
|                                                                 | (1)                 | (2)                  | (3)                  | (4)                  | (5)                 | (6)                 |
| População <sup>a</sup>                                          | 2,910***<br>(0,239) | 0,994***<br>(0,029)  | 2,412***<br>(0,646)  | 0,977***<br>(0,084)  | 2,543***<br>(0,515) | 1,161***<br>(0,175) |
| Densidade Urbana <sup>a</sup>                                   | -1,272**<br>(0,631) | -0,519***<br>(0,049) | -1,724***<br>(0,544) | -0,374***<br>(0,126) | -0,804**<br>(0,373) | -0,429**<br>(0,170) |
| PIB per capita <sup>a</sup>                                     | 1,127***<br>(0,169) | 0,964***<br>(0,044)  | 1,743***<br>(0,198)  | 1,170***<br>(0,085)  | 2,247***<br>(0,363) | 0,695**<br>(0,267)  |
| Partic. PIB industrial                                          | 0,287***<br>(0,042) | 0,129***<br>(0,018)  | 0,065***<br>(0,020)  | 0,040***<br>(0,008)  | 0,017***<br>(0,005) | 0,001<br>(0,003)    |
| Dens. <sup>a</sup> x Conc. Urb.                                 | 0,201<br>(0,170)    | -0,080***<br>(0,011) | 0,862*<br>(0,470)    | -0,091***<br>(0,024) |                     |                     |
| Dens. <sup>a</sup> x NE                                         | 0,733<br>(0,612)    | 0,153***<br>(0,020)  | 0,225<br>(0,672)     | -0,049<br>(0,039)    |                     |                     |
| Densidade <sup>a</sup> x N                                      | 0,669<br>(0,784)    | 0,190***<br>(0,022)  | -0,112<br>(0,719)    | -0,184***<br>(0,043) |                     |                     |
| Densidade <sup>a</sup> x SE                                     | 0,449<br>(0,617)    | 0,089***<br>(0,017)  | -0,896<br>(0,708)    | -0,281***<br>(0,044) |                     |                     |
| Densidade <sup>a</sup> x S                                      | -0,367<br>(0,628)   | -0,017<br>(0,018)    | 0,741<br>(1,318)     | -0,277***<br>(0,047) |                     |                     |
| Constante                                                       |                     | -1,403***<br>(0,387) |                      | -1,209<br>(1,105)    |                     | -3,254*<br>(1,861)  |
| Efeitos Individuais                                             | EF                  | EA                   | EF                   | EA                   | EF                  | EA                  |
| Observações                                                     | 1.665               | 1.665                | 411                  | 411                  | 81                  | 81                  |
| R <sup>2</sup>                                                  | 0,705               | 0,741                | 0,772                | 0,748                | 0,898               | 0,739               |
| R <sup>2</sup> Ajustado                                         | 0,555               | 0,740                | 0,648                | 0,742                | 0,837               | 0,726               |

Fonte: Elaboração própria

### 1.5. Discussões

Os resultados indicam que os coeficientes do logaritmo da densidade urbana são negativos e estatisticamente significativos em todas as estimativas e escalas geográficas. Nos modelos estimados, a densidade urbana mais alta está significativamente associada a emissões urbanas agregadas mais baixas, após o controle de outros fatores, como desenvolvimento econômico e tamanho da população. Este resultado está em linha com a avaliação de que cidades densas podem exigir menos viagens de seus moradores e trabalhadores, podem exigir menos energia para aquecer e resfriar residências e podem abrigar atividades econômicas menos poluentes do que cidades mais extensas (Gonzalez, 2005). Evidencia-se que o impacto ambiental está associado principalmente à demografia, mas não se resume a ela.



O tamanho da população tem o efeito positivo e significativo em todos os níveis de agregação espacial. Os coeficientes acima de 1 (um) sugerem que parece haver um aumento mais do que proporcional nas emissões urbanas quando a população aumenta. Vale notar que os coeficientes estimados para a população são sistematicamente maiores que 1, o que sugere que aumentos na população levam a aumentos mais do que proporcionais nas emissões e, portanto, a aumentos nas emissões per capita<sup>33</sup>. Adicionalmente, as estimções apontam que regiões urbanas de maior renda *per capita* tendem a emitir mais emissões urbanas de GEE. Os resultados indicam ainda que as características da economia local têm importância significativa para explicar a variação da poluição. A importância da presença da indústria para as emissões cresce paulatinamente à medida que escalas mais desagregadas são consideradas.

Em relação aos possíveis problemas de endogeneidade, frequentemente apontados em estudos empíricos sobre poluição, destaca-se que as características das emissões de GEE reduzem significativamente essa possibilidade. De fato, se a poluição causa um efeito local que afeta a qualidade de vida, a saúde da população ou algum outro aspecto, modificando assim a decisão de localização e, portanto, tendo algum efeito sobre a forma urbana, isso traria uma causalidade reversa que precisaria ser tratada em termos metodológicos. Uma das possibilidades seria o uso de estimadores com variáveis instrumentais (IV). A literatura costuma abordar o problema da poluição de forma distinta quando se trata de poluidores de efeito local e daqueles de efeito global. As emissões de GEE tendem a se encaixar mais no segundo tipo de efeito (Borck; Tabuchi, 2019). Uma vez que os efeitos da poluição global são independentes da localização do indivíduo, a preocupação com a causalidade reversa é minimizada neste contexto.

De todo modo, cabe ressaltar que as regressões consideram, para os dados emissões a média móvel de 3 anos, centralizada no ano de referência do Censo Demográfico. A motivação principal dessa estratégia foi suavizar possíveis oscilações de curto prazo nas emissões, especialmente ligadas à dinâmica dos ciclos econômicos, tratamento semelhante ao que foi feito para o PIB. Com isso, está sendo utilizada a informação de emissões um ano à frente e um ano atrás ao ano de referência utilizado para o cálculo da densidade.

---

<sup>33</sup> Utilizando as propriedades logarítmicas, pode-se concluir que o impacto aproximado de dobrar a população seria de  $(2^{\theta-1} - 1) \times 100$  sobre as emissões per capita (Borck; Schrauth, 2021). Assim,  $\theta$  estimado em 2,74 significaria que dobrar a população poderia levar a um aumento de 234% nas emissões *per capita*. Já no caso das AMC's pertencentes a concentrações urbanas, em que a elasticidade estimada é de menor do que 1 (0,864), dobrar a população levaria a uma redução nas emissões per capita de 9%.

Como temas para aprofundamento das análises e pesquisa futura, é possível indicar que as especificações sejam submetidas a testes adicionais a fim de refinar as estimativas e analisar a robustez dos resultados. Quando possível, adicionar as informações de população urbana e total obtidas pelo Censo Demográfico de 2022 pode trazer maior variabilidade, além de enriquecer a análise ao incorporar a dinâmica mais recente. Além disto, ampliar o horizonte de análise pode tornar possível considerar na análise fatores que têm menor variação no nível “individual” em períodos curtos, mas mudanças estruturais relevantes em décadas de análise. Assim, pode fazer sentido testar como as mudanças climáticas afetam as emissões urbanas de GEE.

Para testar se restam problemas relevantes com variáveis omitidas, alguns testes adicionais podem ser feitos. Uma questão importante a se considerar a respeito do efeito da densidade, apontada por Sarzynski (2012), com base nos achados de Jorgenson *et al.* (2010), diz respeito à presença de favelas urbanas, muito densas, nas quais os moradores consomem menos energia, e, portanto, produzem menos emissões, do que em outras formas de desenvolvimento urbano. Uma análise adicional seria necessária para examinar o impacto da presença das favelas nas emissões. As relações entre setores econômicos e emissões também pode ser refinada a partir de informações do PIB ou de variáveis de emprego por subsetores. Adicionalmente, pode-se também mensurar medidas mais extensas e diversificadas da forma urbana, as quais permitam avaliar aspectos como espraiamento ao longo do tempo (Schneider *et al.*, 2005; Angel *et al.* (2011)).

Um próximo passo metodológico seria testar para a existência de autocorrelação espacial. A autocorrelação espacial é definida como a correlação positiva ou negativa de uma variável consigo mesma devido à localização espacial das observações (Loonis; Bellefon, 2018, pág 67). É possível que as emissões urbanas de uma determinada área geográfica seja influenciada pelas emissões de seus vizinhos, sendo o aspecto de deslocamento entre cidades (movimentos pendulares para trabalho ou estudo) uma das possíveis fontes de autocorrelação espacial. Os testes executados neste sentido, porém, mostraram um valor positivo e significativo para o teste de Moran (Moran's I), porém relativamente baixo quando considerada a desagregação por AMC (cerca de 0,30 considerando a definição de matriz de vizinhança pelos 5 vizinhos mais próximos). O valor do teste diminui à medida que a agregação aumenta. Como dito, as estimações de painel espacial em efeitos fixos e aleatórios na estrutura SARAR não apresentaram resultados consistentes e precisariam ser refinadas, bem como submetidas a testes adicionais.

## 1.6. Conclusões

Com base nos resultados obtidos, podemos concluir que a densidade urbana tende a desempenhar um papel significativo na redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) nas regiões urbanas brasileiras. O impacto da densidade nas emissões é estimado em -1,224 (elasticidade) para o principal modelo no nível das AMC's, sendo reduzido para 0,864 quando se trata de AMC's pertencentes a concentrações urbanas. A relação negativa e estatisticamente significativa entre o logaritmo da densidade urbana e as emissões de GEE indica que regiões mais densas estão associadas a menores níveis de poluição atmosférica e que esse efeito é maior para áreas urbanas menores. Os resultados são estatisticamente significativos e robustos para diferentes especificações e escalas de agregações, embora com diferentes magnitudes.

Além disso, os achados destacam a importância da demografia e da renda na determinação das emissões de GEE. O aumento da população está significativamente relacionado ao aumento das emissões, sugerindo que o crescimento populacional pode amplificar os impactos ambientais. Da mesma forma, regiões urbanas com maior renda tendem a emitir mais GEE, assim como aquelas com participação da indústria no PIB. Portanto, para mitigar os impactos ambientais nas áreas urbanas, políticas que promovam o desenvolvimento de cidades mais densas, além de medidas que incentivem a redução das emissões industriais, são fundamentais.

## REFERÊNCIAS

- AHLFELDT, G. M.; PIETROSTEFANI, E. The economic effects of density: A synthesis. **Journal of Urban Economics**, v. 111, n. February, p. 93–107, 2019.
- BORCK, R.; PFLÜGER, M. Green cities? Urbanization, trade, and the environment. **Journal of Regional Science**, v. 59, n. 4, p. 743–766, 2019.
- BORCK, R.; SCHRAUTH, P. Population Density and Urban Air Quality. **REGIONAL SCIENCE AND URBAN ECONOMICS**, v. 86, 2021.
- BORCK, R.; TABUCHI, T. Pollution and city size: Can cities be too small? **Journal of Economic Geography**, v. 19, n. 5, p. 995–1020, 2019.
- CASTELLS-QUINTANA, D.; DIENESCH, E.; KRAUSE, M. Air Pollution in an Urban World: A Global View on Density, Cities and Emissions. **ECOLOGICAL ECONOMICS**, v. 189, 2021.
- CHENG, L.; MI, Z. F.; SUDMANT, A.; COFFMAN, D. Bigger Cities Better Climate? Results from an Analysis of Urban Areas in China. **ENERGY ECONOMICS**, v. 107, 2022.
- CHENG, Z.; HU, X. The Effects of Urbanization and Urban Sprawl on CO2 Emissions in China. **Environment, Development and Sustainability**, 2022. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85122829564&doi=10.1007%2Fs10668-022-02123-x&partnerID=40&md5=df97836fb8fb3ae6f93add2ac4bc9d57>>.
- COLE, M. A.; NEUMAYER, E. Examining the impact of demographic factors on air pollution. **Population and Environment**, v. 26, n. 1, p. 5-21, 2004.
- DURANTON, G.; TURNER, M. A. Urban form and driving: Evidence from US cities. **Journal of Urban Economics**, v. 108, p. 170–191, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jue.2018.10.003>>.
- EHRL, P. **Minimum comparable areas for the period 1872-2010: an aggregation of Brazilian municipalities**. *Estudos Econômicos (São Paulo)*, v. 47, p. 215-229, 2017.
- FEDERATIVE REPUBLIC OF BRAZIL. NATIONALLY DETERMINED CONTRIBUTION (NDC) to the Paris Agreement under the UNFCCC. n. October 2023, 2023.
- GLAESER, E. (2011). *Triumph of the city: How urban spaces make us human*. **Pan Macmillan**.
- GLAESER, E. L.; KAHN, M. E. The Greenness of Cities: Carbon Dioxide Emissions and Urban Development. **JOURNAL OF URBAN ECONOMICS**, v. 67, n. 3, p. 404–418, 2010.
- GOVERNMENT OF THE FEDERATIVE REPUBLIC OF BRAZIL. **Intended Nationally Determined Contribution: Towards achieving the objective of the United Nations Framework Convention on Climate Change** *Intended Nationally Determined Contribution*. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <[http://www4.unfccc.int/Submissions/INDC/Published Documents/Brazil/1/BRAZIL iNDC english FINAL.pdf](http://www4.unfccc.int/Submissions/INDC/Published%20Documents/Brazil/1/BRAZIL%20INDC%20english%20FINAL.pdf)>.

GUDIPUDI, R.; FLUSCHNIK, T.; ROS, A. G. C.; WALTHER, C.; KROPP, J. P. City Density and CO2 Efficiency. **ENERGY POLICY**, v. 91, p. 352–361, 2016.

GUO, F.; ZHENG, X.; WANG, C.; ZHANG, L. Sharing Matters: Household and Urban Economies of Scale for a Carbon-Neutral Future. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 184, 2022.

GUO, S.; ZHANG, Y.; QIAN, X.; MING, Z.; NIE, R. Urbanization and CO2 emissions in resource-exhausted cities: evidence from Xuzhou city, China. **Natural Hazards**, v. 99, n. 2, p. 807–826, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11069-019-03776-0>>.

HILBER, C. A. L.; PALMER, C. Urban Development and Air Pollution: Evidence from a Global Panel of Cities. **SSRN Electronic Journal**, n. 175, 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Censo Brasileiro de 1991. Rio de Janeiro: IBGE, 1992.

\_\_\_\_\_. Censo Brasileiro de 2000 . Rio de Janeiro: IBGE, 2002.

\_\_\_\_\_. Censo Brasileiro de 2010 . Rio de Janeiro: IBGE, 2012.

\_\_\_\_\_. (2016). Arranjos populacionais e concentrações urbanas no Brasil. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE. 167 p. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/divisao-regional/15782-arranjos-populacionais-e-concentracoes-urbanas-do-brasil.html?=&t=acesso-ao-produto>. Acesso em: mai. 2022.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA – Ipeadata. Dados macroeconômicos e regionais. Disponível em: <<http://www.ipeadata.gov.br>>.

JORGENSEN, A. K.; CLARK, B. Societies consuming nature: A panel study of the ecological footprints of nations, 1960–2003. **Social Science Research**, v. 40, n. 1, p. 226-244, 2011.

LALL, S.; LEBRAND, M.; PARK, H.; STURM, D.; VENABLES, A. Pancakes to Pyramids: City Form to Promote Sustainable Growth. **The World Bank**, p. 154, 2021. Disponível em: <<https://www.worldbank.org/en/topic/urbandevelophttp://documents.worldbank.org/curated/en/554671622446381555/City-Form-to-Promote-Sustainable-Growth>>.

LEE, S.; LEE, B. The Influence of Urban Form on GHG Emissions in the US Household Sector. **ENERGY POLICY**, v. 68, p. 534–549, 2014.

LI, Z. H.; DENG, X. Z.; PENG, L. Uncovering Trajectories and Impact Factors of CO2 Emissions: A Sectoral and Spatially Disaggregated Revisit in Beijing. **TECHNOLOGICAL FORECASTING AND SOCIAL CHANGE**, v. 158, 2020.

LOONIS, V., & de BELLEFON, M.-P. (2018). Handbook of Spatial Analysis Méthodes Méthodes Méthodes The United Nations Committee of Experts on Global Geospatial Information. INSEE Eurostat. [www.insee.fr](http://www.insee.fr)

LIU, J.; LI, M.; DING, Y. Econometric Analysis of the Impact of the Urban Population Size on Carbon Dioxide (CO2) Emissions in China. **Environment, Development and Sustainability**, v. 23, n. 12, p. 18186–18203, 2021. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0->

85105357695&doi=10.1007%2Fs10668-021-01433-w&partnerID=40&md5=8badf2d8a29269bbc15660d89cb46e30>.

PAGANI, R. N.; KOVALESKI, J. L.; RESENDE, L. M. Methodi Ordinatio: a proposed methodology to select and rank relevant scientific papers encompassing the impact factor, number of citation, and year of publication. **Scientometrics**, v. 105, n. 3, p. 2109–2135, 2015.

PAGANI, R. N.; KOVALESKI, J. L.; RESENDE, L. M. M. Advances in the composition of methodi ordinatio for systematic literature review. **Ciencia da Informacao**, v. 46, n. 2, p. 161–187, 2017.

PARIKH, J.; SHUKLA, V. Urbanization, energy use and greenhouse effects in economic development: Results from a cross-national study of developing countries. **Global environmental change**, v. 5, n. 2, p. 87-103, 1995.

Projeto MapBiomias – Coleção 8.0 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil, acessado em 18/02/2024 através do link: [https://storage.googleapis.com/mapbiomas-public/initiatives/brasil/collection\\_8/downloads/statistics/tabela\\_geral\\_mapbiomas\\_col8\\_biomias\\_municipios.xlsx](https://storage.googleapis.com/mapbiomas-public/initiatives/brasil/collection_8/downloads/statistics/tabela_geral_mapbiomas_col8_biomias_municipios.xlsx)

REIS, E.; PIMENTEL, M.; ALVARENGA, A. I.; SANTOS, M. D. C. H. **Áreas mínimas comparáveis para os períodos intercensitários de 1872 a 2000**. Rio de Janeiro: Ipea/Dimac, 2008. 40 p.

SADORSKY, P. The effect of urbanization on CO2 emissions in emerging economies. **Energy Economics**, v. 41, p. 147–153, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.eneco.2013.11.007>>.

SANTOS, M. (1993). A urbanização brasileira. São Paulo, Editora Hucitec (pp. 17 a 56).

SARZYNSKI, A. Bigger Is Not Always Better: A Comparative Analysis of Cities and their Air Pollution Impact. **Urban Studies**, v. 49, n. 14, p. 3121–3138, 2012.

SPOSITO, Maria Encarnação Beltrão (2015). Metropolização do espaço: cidades médias, lógicas econômicas e consumo. In: FERREIRA, Álvaro; RUA, João; MATTOS, Regina Célia (org.). *Desafios da metropolização do espaço*. Rio de Janeiro, Editora Consequência.

SETO, K. C.; SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ, R.; FRAGKIAS, M. The new geography of contemporary urbanization and the environment. **Annual Review of Environment and Resources**, v. 35, p. 167–194, 2010.

TORRAS, M.; BOYCE, J. K. Income, inequality, and pollution: a reassessment of the environmental Kuznets curve. **Ecological economics**, v. 25, n. 2, p. 147-160, 1998.

WANG, F.; DONG, M.; REN, J.; LUO, S.; ZHAO, H.; LIU, J. The Impact of Urban Spatial Structure on Air Pollution: Empirical Evidence from China. **Environment, Development and Sustainability**, v. 24, n. 4, p. 5531–5550, 2022. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85111165024&doi=10.1007%2Fs10668-021-01670-z&partnerID=40&md5=0b347cf8dcc0ee05a909bd4140ac4bfd>>.

YI, Y. C.; WANG, Y. J.; LI, Y. Q.; QI, J. Impact of Urban Density on Carbon Emissions in

China. **APPLIED ECONOMICS**, v. 53, n. 53, p. 6153–6165, 2021.

YORK, R.; ROSA, E. A.; DIETZ, T. STIRPAT, IPAT and ImPACT: Analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts. **Ecological Economics**, v. 46, n. 3, p. 351–365, 2003.

ZHANG, C. G.; LIN, Y. Panel Estimation for Urbanization, Energy Consumption and CO2 Emissions: A Regional Analysis in China. **ENERGY POLICY**, v. 49, p. 488–498, 2012.

## APÊNDICES

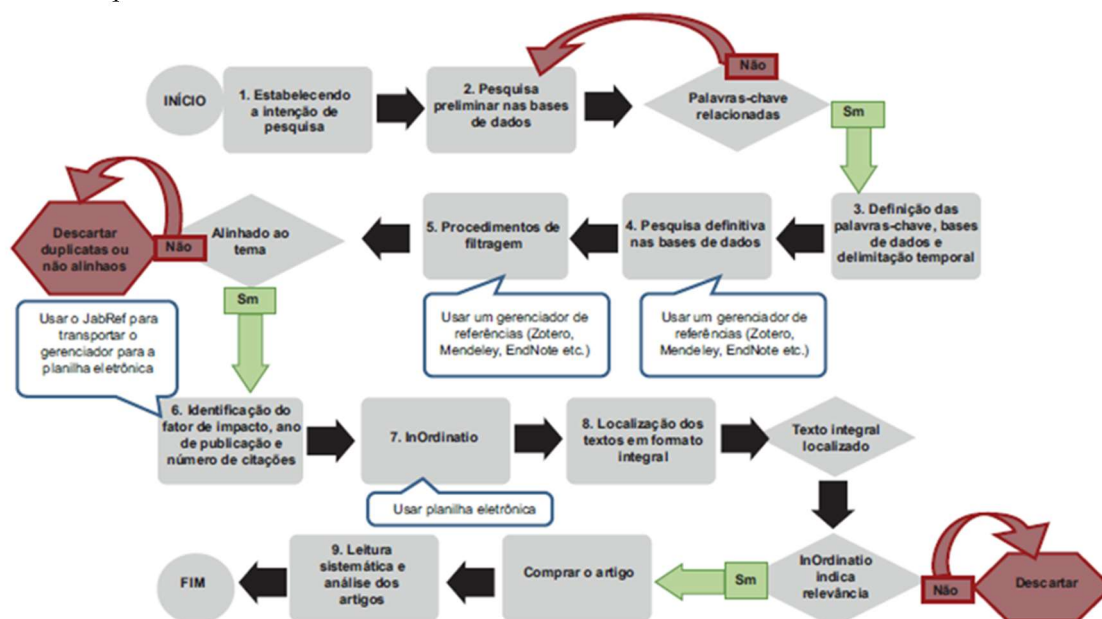
### APÊNDICE 1.A. Revisão sistemática da literatura

O objetivo deste apêndice é detalhar a revisão sistemática de literatura sobre o tema Forma urbana e Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE). Para realizar esta revisão sistemática foi utilizada como referência a metodologia denominada *Methodi Ordinatio*, proposta por Pagani, Kovaleski e Resende (2015) e aprimorada pelos autores em 2017. A escolha pelo método deu-se pela objetividade na organização das referências, bem como na capacidade de utilização de múltiplos critérios para identificar a relevância de cada estudo. Diante do número crescente de publicações encontradas nas principais bases bibliográficas, tal método permite selecionar um portfólio bibliográfico consistente, de forma relativamente rápida e efetiva. Tal proposta não exclui a autonomia do pesquisador, sendo possível estabelecer critérios auxiliares na seleção de artigos, bem como a incorporação de outros trabalhos relevantes de acordo com o conhecimento prévio e o avanço nas leituras do pesquisador.

O *Methodi Ordinatio* mostrou-se uma boa ferramenta para iniciar a pesquisa, uma vez que fornece diretrizes para conduzir a busca, seleção, coleta e classificação das publicações científicas, tornando possível a avaliação da importância acadêmica de um artigo científico, dentre um grande número de resultados de busca. A metodologia fornece uma ordenação de relevância a partir de três atributos relevantes: fator de impacto, ano de publicação e o número de citações (Pagani; Kovaleski; Resende, 2017). Abaixo a Figura 1.A-1 traz um exemplo esquemático do procedimento retirado do referido estudo.



**Figura 1.A-1:** Etapas da Methodi Ordinatio e a utilização das tecnologias da informação e comunicação (TICs) em cada etapa



Fonte: Pagani; Kovaleski; Resende, 2017

Tendo como base essa metodologia, foram realizadas as 9 etapas para a revisão sistemática, descritas de forma mais genérica abaixo e detalhadas em seguida para cada uma das bases de dados bibliográficas utilizadas.

#### 1) Estabelecimento da intenção da pesquisa:

O objetivo da revisão sistemática foi identificar a literatura relevante que investiga os impactos da forma urbana nas emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), com foco nos estudos que utilizam como unidade investigativa as áreas urbanas ou cidades. Pretendeu-se levantar artigos seminais e, principalmente, identificar o que tem sido feito mais recentemente na literatura.

#### 2) Pesquisa preliminar e definição das palavras-chave nas bases de dados:

A tradução em inglês para as palavras-chave é "urban form" AND "greenhouse gas emissions", e essa combinação, entre outras, foi testada em diversas bases de dados: Jstor, Web of Science, Scopus e Proquest. Inicialmente, verificou-se que uma busca mais seletiva, sem a utilização de sinônimos e variações, retornava um número muito restrito de referências (4 referências nas principais bases pesquisadas). Ampliou-se então o escopo ao fazer uso de operadores que permitiram a busca por sinônimos e por variações da palavra, como plural e singular. Utilizou-se o operador AND para delimitar as referências que abordam conjuntamente a temática forma urbana, cidades e emissões de gases de efeito estufa (e suas variações). Por

fim, optou-se por excluir os artigos que têm como foco a curva de Kuznets, que tangencia o tema, mas não é o foco do presente trabalho.

### 3) Definição das bases de dados a serem utilizadas:

Dentre as bases testadas, foram selecionadas para a coleta de dados a *Web of Science*<sup>34</sup> e a *Scopus*<sup>35</sup>, ambas disponibilizadas pelo Portal de Periódicos da CAPES. A escolha das bases baseou-se no razoável volume de publicações com as palavras-chave pesquisadas, disponibilidade maior de acesso aos materiais publicados e consistência apresentada durante as buscas. A *Web of Science* é uma plataforma referencial de citações científicas, que contém base de dados de informações de bibliografias e citações a partir de quase 1,9 bilhão de referência citadas em mais de 171 milhões de registros<sup>36</sup>. Já a *Scopus* é uma plataforma internacional de indexação de trabalho científicos, como artigos de periódicos e de eventos e livros.

### 4) Definição do gerenciador de referências:

O gerenciador de referências utilizado para coleta e armazenamento de dados nesta pesquisa foi o Mendeley<sup>37</sup>.

### 5) Procedimentos de filtragem:

Após definir as palavras-chave, foram determinados os filtros a serem utilizados. Como os filtros diferem por base de dados, tal detalhamento será feito individualmente abaixo. Além disso, foi realizada filtragem por meio da leitura dos títulos, identificando-se aqueles alinhados ao tema e os não-alinhados.

### 6) Identificação do fator de impacto, ano de publicação e número de citações:

As informações dos artigos foram exportadas para planilha eletrônica, destacando-se Título do documento, Nome da publicação, Nome dos autores, Número de citações, Ano de publicação. A essas, adicionou-se as informações referentes ao fator de impacto (métricas JCR e SJR) de 2021; à idade do artigo, calculada como a diferença entre o ano de busca (2022) e o ano de publicação do artigo; e ao número de citações coletado na referida base de dados.

### 7) Classificação dos artigos utilizando o *InOrdinatio*:

O método proposto por Pagani; Kovalski; Resende (2017) visa equacionar fator de impacto, número de citações e ano de publicação de cada artigo ao ordenar estudos de acordo

<sup>34</sup> Scientific Electronic Library Online Citation Index - SciELO Citation Index (Web of Science)

<sup>35</sup> SCOPUS (Elsevier)

<sup>36</sup> <https://clarivate.com/webofsciencegroup/campaigns/web-of-science-base-de-dados-de-citacao-global-independentemente-mais-confiavel-do-mundo/>

<sup>37</sup> <https://www.mendeley.com>

com esses parâmetros científicos. A seguinte equação é utilizada para ordenar os artigos selecionados:

$$\text{InOrdinatio} = (\text{IF} / 1000) + (\alpha * (10 - (\text{Research Year} - \text{Publish Year}))) + (\text{Ci})$$

em que o IF é o fator de impacto,  $\alpha$  é um fator de ponderação que varia de 1 a 10 atribuído pelo pesquisador, Research Year é o ano em que a pesquisa foi desenvolvida, Publish Year é o ano em que o artigo foi publicado, e Ci é o número de vezes que o artigo foi citado (Pagani; Kovaleski; Resende, 2015). Com vistas a identificar os artigos mais recentes que vem se tornando referência no tema, considerando particularmente importante os avanços metodológicos especialmente ligados à utilização de dados gerados por satélites, utilizou-se como parâmetro  $\alpha$  o valor 10 (Pagani; Kovaleski; Resende, 2015). Assim, os artigos mais recentes foram abrangidos pela busca e pela classificação. De todo modo, como não se utilizou uma delimitação temporal, os artigos considerados clássicos, com maior número de citações ao longo dos anos, também foram contemplados na classificação.

#### 8) Localização do texto em formato integral

Após a classificação pelo *InOrdinatio*, foi feita localização dos trabalhos em formato integral, diretamente no site da revista ou no site do Google Scholar, dentre outras buscas.

#### 9) Leitura sistemática e análise dos artigos

A classificação pelo *InOrdinatio* possibilita estabelecer uma ordem de prioridade na leitura dos artigos. A partir disso, a leitura sistemática foi feita em duas etapas. Primeiro, realizou-se a leitura do Abstract, identificando-se características relevantes como “unidade de investigação”, destacando-se aqueles que avaliam as cidades/áreas urbanas; se o estudo aborda a análise de impacto da forma urbana sobre as emissões com o uso de abordagem empírica; ou ainda se propõe um referencial teórico relevante. Tal na análise foi feita para todos os artigos classificados pelo *InOrdinatio*. Com base nesta análise, foram selecionados os artigos com Abstract alinhado e a leitura integral foi realizada de acordo com a prioridade de ordenação estabelecida pelo ranking obtido no *InOrdinatio*. Abaixo será detalhada a sistematização da busca em cada plataforma individualmente.

Na base de dados da *Web of Science*, os critérios básicos de filtros aplicados são descritos na Tabela 1.A-1. Após diversos testes para definição das palavras-chave, definiu-se um conjunto de elementos capaz de abranger as diferentes nomenclaturas e variações identificadas, bem como a exclusão do que tangencia o tema, mas está fora do escopo do presente trabalho.

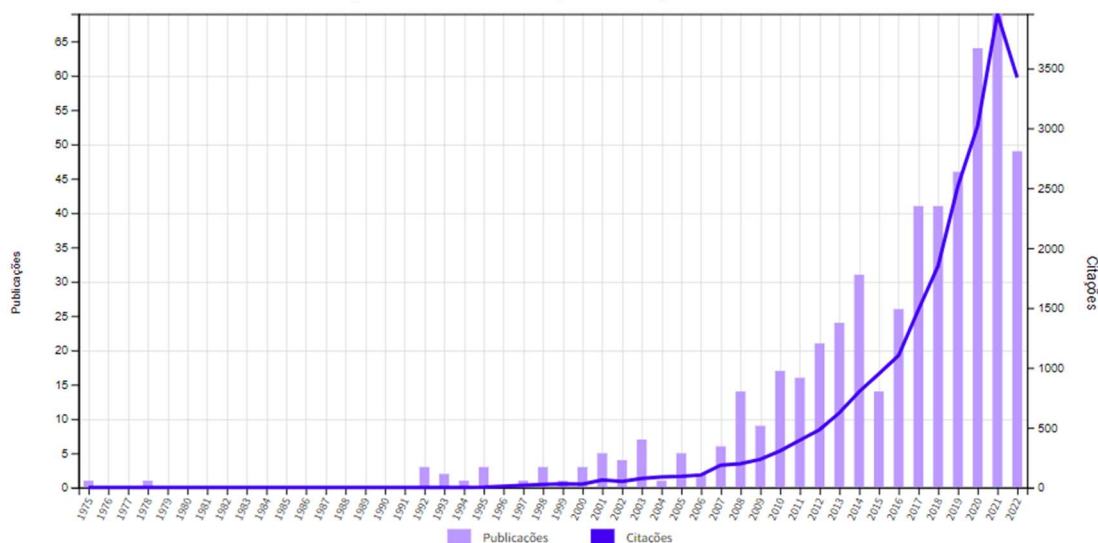
Após definição das palavras-chave, foram realizadas três buscas. A primeira, sem nenhum tipo de filtro, resultou em 33.548 documentos. Na segunda busca, aplicou-se o filtro “Tipos de documento: Artigo or Artigo de revisão”, tendo sido obtidos 30.024 documentos. Por fim, a terceira e última busca resultou em 531 documentos e contou com os filtros: “Áreas de pesquisa: Business Economics” e “Tipos de documento: Artigo or Artigo de revisão”.

**Tabela 1.A-1:** Buscas por palavras-chave, filtro e número de documentos encontrados

| Data de realização da busca | Busca                                                                                                                                                        | Filtros                                                                                    | Nº documentos |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| 05/10/2022                  | ((Urban* OR Cit*) AND (Form OR Shape OR Density OR compact* OR sprawl) AND (Emission\$ OR pollution OR (Greenhouse AND Gases) OR "air quality") NOT kuznets) | (sem filtros)                                                                              | <b>33.548</b> |
| 05/10/2022                  | ((Urban* OR Cit*) AND (Form OR Shape OR Density OR compact* OR sprawl) AND (Emission\$ OR pollution OR (Greenhouse AND Gases) OR "air quality") NOT kuznets) | Tipos de documento: Artigo or Artigo de revisão.                                           | <b>30.024</b> |
| 05/10/2022                  | ((Urban* OR Cit*) AND (Form OR Shape OR Density OR compact* OR sprawl) AND (Emission\$ OR pollution OR (Greenhouse AND Gases) OR "air quality") NOT kuznets) | Áreas de pesquisa: Business Economics.<br>Tipos de documento: Artigo or Artigo de revisão. | <b>531</b>    |

Fonte: Elaboração própria

Após a aplicação dos critérios descritos na Tabela 1.A-1, procedeu-se com a execução de buscas na plataforma de dados *Web of Science*. O total de 531 artigos gerado foi considerado para análise bibliométrica, sem nenhuma exclusão. A evolução do número de citações e publicações ao longo do tempo mostra um aumento do interesse acadêmico no tema nas duas últimas décadas, com maior ênfase nos últimos cinco anos (Gráfico 1.A-1).

**Gráfico 1.A-1:** Número de citações e publicações ao longo do tempo

Fonte: Web of Science, com base em busca própria

Os resultados da busca foram exportados para o VOSviewer, um software voltado para a construção e visualização de redes bibliométricas. A análise a partir do VOSviewer permite identificar os principais autores em termos de número de documentos e citações (Tabela 1.A-2), os países de filiações dos autores (Tabela 1.A-3) e fontes de publicações (Tabela 1.A-4), respectivamente.

**Tabela 1.A-2:** Autores com maior destaque no tema de pesquisa, por número de documentos e citações

| Autores mais importantes | Documentos | Citações |
|--------------------------|------------|----------|
| kahn, me                 | 5          | 718      |
| wu, j                    | 4          | 21       |
| borck, r                 | 3          | 64       |
| heinonen, j              | 3          | 191      |
| kyriakopoulou, e         | 3          | 9        |
| lin, y                   | 3          | 519      |
| zhang, m                 | 3          | 19       |

Fonte: Web of Science e VOSviewer, com base em busca própria

**Tabela 1.A-3:** Localização geográfica das instituições voltadas à pesquisa, por número de documentos e citações

| Países          | Documentos | Citações |
|-----------------|------------|----------|
| usa             | 50         | 2792     |
| peoples r china | 49         | 2366     |
| france          | 17         | 573      |
| england         | 16         | 765      |
| germany         | 14         | 981      |
| canada          | 10         | 425      |
| italy           | 10         | 738      |
| australia       | 9          | 603      |
| spain           | 8          | 764      |
| belgium         | 7          | 251      |
| japan           | 7          | 888      |
| brazil          | 6          | 124      |

Fonte: Web of Science e VOSviewer, com base em busca própria

**Tabela 1.A-4:** Principais revistas com publicações no tema, por número de documentos e citações

| Publicação                                         | Documentos | Citações |
|----------------------------------------------------|------------|----------|
| ENERGY POLICY                                      | 26         | 2208     |
| JOURNAL OF TRANSPORT GEOGRAPHY                     | 15         | 431      |
| ECOLOGICAL ECONOMICS                               | 13         | 1896     |
| TRANSPORT POLICY                                   | 12         | 409      |
| ENERGY ECONOMICS                                   | 11         | 696      |
| REGIONAL SCIENCE AND URBAN ECONOMICS               | 7          | 161      |
| TECHNOLOGICAL FORECASTING AND SOCIAL CHANGE        | 6          | 158      |
| TRANSPORTATION RESEARCH PART A-POLICY AND PRACTICE | 5          | 88       |
| JOURNAL OF ENVIRONMENTAL ECONOMICS AND MANAGEMENT  | 4          | 82       |
| JOURNAL OF URBAN ECONOMICS                         | 4          | 710      |

Fonte: Web of Science e VOSviewer, com base em busca própria

Adicionalmente, a análise pelo VOSviewer permite também identificar as co-citações, parâmetro que identifica os autores/artigos mais influentes que embasaram os trabalhos selecionados, a partir do número de artigos que citam pares de documentos iguais. A co-citação é utilizada para identificar documentos seminais. Na Tabela 1.A-5 o resultado para a busca realizada.

**Tabela 1.A-5:** Trabalhos com maior número de co-citações

| Trabalhos seminais                                                                  | Citações recebidas pelo portfólio selecionado |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| glaeser el, 2010, j urban econ, v67, p404, doi 10.1016/j.jue.2009.11.006            | 28                                            |
| brownstone d, 2009, j urban econ, v65, p91, doi 10.1016/j.jue.2008.09.002           | 22                                            |
| ewing r, 2010, j am plann assoc, v76, p265, doi 10.1080/01944361003766766           | 19                                            |
| bento am, 2005, rev econ stat, v87, p466, doi 10.1162/0034653054638292              | 18                                            |
| kenworthy j, 1989, cities automobile de                                             | 18                                            |
| grossman gm, 1995, q j econ, v110, p353, doi 10.2307/2118443                        | 17                                            |
| poumanyvong p, 2010, ecol econ, v70, p434, doi 10.1016/j.ecolecon.2010.09.029       | 17                                            |
| dietz t, 1997, p natl acad sci usa, v94, p175, doi 10.1073/pnas.94.1.175            | 16                                            |
| york r, 2003, ecol econ, v46, p351, doi 10.1016/s0921-8009(03)00188-5               | 16                                            |
| martinez-zarzoso i, 2011, ecol econ, v70, p1344, doi 10.1016/j.ecolecon.2011.02.009 | 15                                            |

Fonte: Web of Science e VOSviewer, com base em busca própria

Após a análise bibliométrica básica, todos os artigos inclusos neste portfólio foram analisados por meio de leituras de títulos para identificar aqueles que possuem um alinhamento ao tema de pesquisa. Exemplos de títulos não alinhados são: “*Urban structural and socioeconomic effects on local, national and international travel patterns and greenhouse gas emissions of young adults*” (Czepkiewicz, 2018) e “*Temporary driving restrictions, air pollution, and contemporaneous health: Evidence from China*” (Han, Liu e Lu, 2020). Foram identificados 141 artigos com títulos alinhados.

Esses artigos selecionados foram ordenados conforme valores de *InOrdination* para definir uma ordem de relevância entre os mesmos. Fez-se, então, a leitura dos Abstracts desses 141 artigos, o que levou à seleção de 25 artigos realmente alinhados ao tema de pesquisa. A seleção pelo *Abstract* permitiu, por exemplo, a exclusão de artigos como “*Cities and greenhouse gas reduction: Policy makers or policy takers?*” de Jaccard *et al.* (2019), o qual trata de integrar um modelo de economia energética com um modelo de uso do solo urbano e infraestrutura para testar as possíveis ações resultantes de políticas potencialmente disponíveis para este governo municipal na prossecução da sua meta de 2050 de 100% de energia renovável e uma redução de 80% nas emissões de GEE. Os 25 artigos finais, listados na Tabela 1.A-6, foram selecionados para aprofundamento da leitura, juntamente com os trabalhos selecionados via Scopus, a serem apresentados na próxima seção.

**Tabela 1.A-6:** Resultado final da seleção de artigos com base no Methodi Ordination e filtros próprios (continua)

| Ordenação | Artigos selecionados (autores, ano, revista)                                           | Fator de Impacto | Citações | Ano de Publicação |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----------|-------------------|
| 1         | Zhang, CG; Lin, Y, 2012, ENERGY POLICY                                                 | 7.576            | 474      | 2012              |
| 2         | Glaeser, EL, 1998, JOURNAL OF ECONOMIC PERSPECTIVES                                    | 9.944            | 379      | 1998              |
| 3         | Lee, S; Lee, B, 2014, ENERGY POLICY                                                    | 7.576            | 156      | 2014              |
| 4         | Gaigne, C; Riou, S; Thisse, JF, 2012, JOURNAL OF URBAN ECONOMICS                       | 5.456            | 120      | 2012              |
| 5         | Borck, R; Schrauth, P, 2021, REGIONAL SCIENCE AND URBAN ECONOMICS                      | 2.438            | 32       | 2021              |
| 6         | Yang, XD; Wang, JL; Caona, JH; Renna, SY; Ran, QY; Wu, HT, 2022, EMPIRICAL ECONOMICS   | 2.647            | 21       | 2022              |
| 7         | Liu, K; Xue, MY; Peng, MJ; Wang, CX, 2020, TECHNOLOGICAL FORECASTING AND SOCIAL CHANGE | 10.884           | 27       | 2020              |
| 8         | Cheng, L; Mi, ZF; Sudmant, A; Coffman, D, 2022, ENERGY ECONOMICS                       | 9.252            | 3        | 2022              |
| 9         | Xu, MM; Tan, RP; He, XJ, 2022, ENERGY ECONOMICS                                        | 9.252            | 3        | 2022              |
| 10        | Castells-Quintana, D; Dienesch, E; Krause, M, 2021, ECOLOGICAL ECONOMICS               | 6.536            | 10       | 2021              |
| 11        | Bertram, C; Goebel, J; Krekel, C; Rehdanz, K, 2022, LAND ECONOMICS                     | 2.03             | 0        | 2022              |
| 12        | Guerra, E; Caudillo, C; Monkkonen, P; Montejano, J, 2018, TRANSPORT POLICY             | 6.173            | 35       | 2018              |
| 13        | Kyriakopoulou, E; Picard, PM, 2021, JOURNAL OF ENVIRONMENTAL ECONOMICS AND MANAGEMENT  | 5.84             | 3        | 2021              |
| 14        | Gudipudi, R; Fluschnik, T; Ros, AGC; Walther, C; Kropp, JP, 2016, ENERGY POLICY        | 7.576            | 51       | 2016              |
| 15        | Lee, S; Lee, B, 2020, JOURNAL OF TRANSPORT GEOGRAPHY                                   | 5.899            | 12       | 2020              |
| 16        | Hankey, S; Marshall, JD, 2010, ENERGY POLICY                                           | 7.576            | 110      | 2010              |
| 17        | Schindler, M; Wang, JYT; Connors, RD, 2021, JOURNAL OF TRANSPORT GEOGRAPHY             | 5.899            | 0        | 2021              |
| 18        | Leibowicz, BD, 2020, EUROPEAN JOURNAL OF OPERATIONAL RESEARCH                          | 6.363            | 9        | 2020              |

| Ordenação | Artigos selecionados (autores, ano, revista)                                         | Fator de Impacto | Citações | Ano de Publicação |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----------|-------------------|
| 19        | Yi, YC; Wang, YJ; Li, YQ; Qi, J, 2021, APPLIED ECONOMICS                             | 1.916            | 3        | 2021              |
| 20        | Li, ZH; Deng, XZ; Peng, L, 2020, TECHNOLOGICAL FORECASTING AND SOCIAL CHANGE         | 10.884           | 3        | 2020              |
| 21        | de The, CB; Carantino, B; Lafourcade, M, 2021, REGIONAL SCIENCE AND URBAN ECONOMICS  | 2.438            | 1        | 2021              |
| 22        | Basso, LJ; Navarro, M; Silva, HE, 2021, ECONOMICS OF TRANSPORTATION                  | 2.829            | 0        | 2021              |
| 23        | Cappelli, F; Guastella, G; Pareglio, S, 2021, AESTIMUM                               | 0                | 0        | 2021              |
| 24        | Kyriakopoulou, E, 2021, INTERNATIONAL REVIEW OF ENVIRONMENTAL AND RESOURCE ECONOMICS | 0                | 0        | 2021              |
| 25        | Cai, BF; Zhang, LX, 2014, ENERGY POLICY                                              | 7.576            | 61       | 2014              |

Fonte: Elaboração própria

Na base de dados da *Scopus*, os critérios básicos de filtros aplicados são descritos na Tabela 1.A-7. As palavras-chave usadas na base *Web of Science* tiveram boa aderência também na *Scopus*. Novamente, foram realizadas três buscas. A primeira, sem nenhum tipo de filtro, resultou em 22.405 documentos. Na segunda busca, aplicou-se o filtro “Tipos de documento: Artigo or Artigo de revisão”, tendo sido obtidos 17.651 documentos. Por fim, a terceira e última busca resultou em 249 documentos e contou com os filtros: “*Subject area: Economics, Econometrics and Finance*” e “*Document Type: Article or Review*”.

**Tabela 1.A-7:** Buscas por palavras-chave, filtro e número de documentos encontrados

| Data de realização da busca | Busca                                                                                                                                                             | Filtros                                                                               | Nº documentos |
|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| 05/10/2022                  | ((urban* OR cit*) AND (form OR shape OR density OR compact* OR sprawl) AND (emission\$ OR pollution OR (greenhouse AND gases) OR "air quality")) AND NOT kuznets) | (sem filtros)                                                                         | 22.405        |
| 05/10/2022                  | ((urban* OR cit*) AND (form OR shape OR density OR compact* OR sprawl) AND (emission\$ OR pollution OR (greenhouse AND gases) OR "air quality")) AND NOT kuznets) | Tipos de documento: Artigo or Artigo de revisão.                                      | 17.651        |
| 10/10/2022                  | ((urban* OR cit*) AND (form OR shape OR density OR compact* OR sprawl) AND (emission\$ OR pollution OR (greenhouse AND gases) OR "air quality")) AND NOT kuznets) | Document Type: Article or Review<br>Subject area: Economics, Econometrics and Finance | 249           |

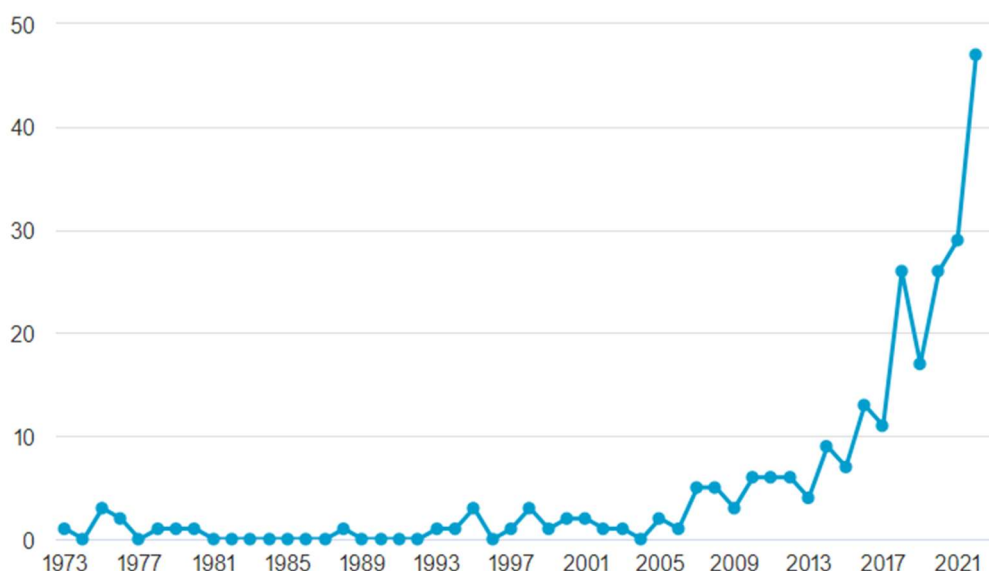
Fonte: Elaboração própria

Após a aplicação dos critérios descritos na Tabela 1.A-7, procedeu-se com a execução de buscas na plataforma de dados *Scopus*. O total de 249 artigos resultantes, 85 duplicados foram excluídos, por terem sido identificados na busca da *Web of Science*. foi considerado para



análise bibliométrica, sem nenhuma exclusão. De forma semelhante ao encontrado na *Web of Science*, há um aumento recente do interesse acadêmico no tema, especialmente nos últimos cinco anos (Gráfico 1.A-2).

**Gráfico 1.A-2:** Número de documentos por ano



Fonte: Scopus, com base em busca própria

Após a análise bibliométrica básica, todos os artigos inclusos neste portfólio foram analisados por meio de leituras de títulos para identificar aqueles que possuem um alinhamento ao tema de pesquisa. Exemplos de títulos não alinhados são: “*Urban structural and socioeconomic effects on local, national and international travel patterns and greenhouse gas emissions of young adults*” (Czepkiewicz, 2018) e “*Temporary driving restrictions, air pollution, and contemporaneous health: Evidence from China*” (Han, Liu e Lu, 2020). Foram identificados 141 artigos com títulos alinhados.

Esses artigos selecionados foram ordenados conforme valores de *InOrdinatio* para definir uma ordem de relevância entre os mesmos. Fez-se, então, a leitura dos Abstracts desses 141 artigos, o que levou à seleção de 25 artigos realmente alinhados ao tema de pesquisa. A seleção pelo *Abstract* permitiu, por exemplo, a exclusão de artigos como “*Cities and greenhouse gas reduction: Policy makers or policy takers?*” de Jaccard *et al.* (2019), o qual trata de integrar um modelo de economia energética com um modelo de uso do solo urbano e infraestrutura para testar as possíveis ações resultantes de políticas potencialmente disponíveis para este governo municipal na prossecução da sua meta de 2050 de 100% de energia renovável e uma redução de 80% nas emissões de GEE. Os 25 artigos finais, listados na Tabela 1.A-8, foram selecionados

para aprofundamento da leitura, juntamente com os trabalhos selecionados via Scopus, a serem apresentados na próxima seção.

**Tabela 1.A-8:** Resultado final da seleção de artigos com base no Methodi Ordinatio e filtros próprios

| Ordenação | Artigos selecionados (autores, ano, revista)                                           | Fator de Impacto | Citações | Ano de Publicação |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----------|-------------------|
| 1         | Zhang, CG; Lin, Y, 2012, ENERGY POLICY                                                 | 7,576            | 474      | 2012              |
| 2         | Glaeser, EL, 1998, JOURNAL OF ECONOMIC PERSPECTIVES                                    | 9,944            | 379      | 1998              |
| 3         | Lee, S; Lee, B, 2014, ENERGY POLICY                                                    | 7,576            | 156      | 2014              |
| 4         | Gaigne, C; Riou, S; Thisse, JF, 2012, JOURNAL OF URBAN ECONOMICS                       | 5,456            | 120      | 2012              |
| 5         | Borck, R; Schrauth, P, 2021, REGIONAL SCIENCE AND URBAN ECONOMICS                      | 2,438            | 32       | 2021              |
| 6         | Yang, XD; Wang, JL; Caona, JH; Renna, SY; Ran, QY; Wu, HT, 2022, EMPIRICAL ECONOMICS   | 2,647            | 21       | 2022              |
| 7         | Liu, K; Xue, MY; Peng, MJ; Wang, CX, 2020, TECHNOLOGICAL FORECASTING AND SOCIAL CHANGE | 10,884           | 27       | 2020              |
| 8         | Cheng, L; Mi, ZF; Sudmant, A; Coffman, D, 2022, ENERGY ECONOMICS                       | 9,252            | 3        | 2022              |
| 9         | Xu, MM; Tan, RP; He, XJ, 2022, ENERGY ECONOMICS                                        | 9,252            | 3        | 2022              |
| 10        | Castells-Quintana, D; Dienesch, E; Krause, M, 2021, ECOLOGICAL ECONOMICS               | 6,536            | 10       | 2021              |
| 11        | Bertram, C; Goebel, J; Krekel, C; Rehdanz, K, 2022, LAND ECONOMICS                     | 2,03             | 0        | 2022              |
| 12        | Guerra, E; Caudillo, C; Monkkonen, P; Montejano, J, 2018, TRANSPORT POLICY             | 6,173            | 35       | 2018              |
| 13        | Kyriakopoulou, E; Picard, PM, 2021, JOURNAL OF ENVIRONMENTAL ECONOMICS AND MANAGEMENT  | 5,84             | 3        | 2021              |
| 14        | Gudipudi, R; Fluschnik, T; Ros, AGC; Walther, C; Kropp, JP, 2016, ENERGY POLICY        | 7,576            | 51       | 2016              |
| 15        | Lee, S; Lee, B, 2020, JOURNAL OF TRANSPORT GEOGRAPHY                                   | 5,899            | 12       | 2020              |
| 16        | Hankey, S; Marshall, JD, 2010, ENERGY POLICY                                           | 7,576            | 110      | 2010              |
| 17        | Schindler, M; Wang, JYT; Connors, RD, 2021, JOURNAL OF TRANSPORT GEOGRAPHY             | 5,899            | 0        | 2021              |
| 18        | Leibowicz, BD, 2020, EUROPEAN JOURNAL OF OPERATIONAL RESEARCH                          | 6,363            | 9        | 2020              |
| 19        | Yi, YC; Wang, YJ; Li, YQ; Qi, J, 2021, APPLIED ECONOMICS                               | 1,916            | 3        | 2021              |
| 20        | Li, ZH; Deng, XZ; Peng, L, 2020, TECHNOLOGICAL FORECASTING AND SOCIAL CHANGE           | 10,884           | 3        | 2020              |
| 21        | de The, CB; Carantino, B; Lafourcade, M, 2021, REGIONAL SCIENCE AND URBAN ECONOMICS    | 2,438            | 1        | 2021              |
| 22        | Basso, LJ; Navarro, M; Silva, HE, 2021, ECONOMICS OF TRANSPORTATION                    | 2,829            | 0        | 2021              |
| 23        | Cappelli, F; Guastella, G; Pareglio, S, 2021, AESTIMUM                                 | 0                | 0        | 2021              |
| 24        | Kyriakopoulou, E, 2021, INTERNATIONAL REVIEW OF ENVIRONMENTAL AND RESOURCE ECONOMICS   | 0                | 0        | 2021              |
| 25        | Cai, BF; Zhang, LX, 2014, ENERGY POLICY                                                | 7,576            | 61       | 2014              |

Fonte: Elaboração própria

Com base nos resultados obtidos nas duas bases de dados pelo *Methodi Ordinatio* e em uma posterior análise criteriosa dos artigos selecionados, chegou-se a uma seleção final de trabalhos empíricos mais relevantes para o propósito da presente pesquisa. Na Tabela 1.A-9, encontra-se o detalhamento dos principais artigos empíricos selecionados, bem como os respectivos impactos estimados empiricamente da urbanização e da densidade urbana sobre a poluição do ar.

**Tabela 1.A-9:** Impactos estimados empiricamente da urbanização e da densidade urbana sobre a poluição do ar

| Métrica                  | Tipo de poluição                            | Efeito positivo                                                                                | Relação incerta / curva U invertido | Efeito negativo                                                                                                                                                                                                                         |
|--------------------------|---------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Urbanização <sup>1</sup> | Emissões de GEE                             | Zhang; Lin (2012)                                                                              |                                     | Cheng; Mi; Sudmant; Coffman (2022)                                                                                                                                                                                                      |
|                          | CO <sub>2</sub> (gás carbônico)             | Li; Deng; Peng (2020) (para emissões residenciais)<br>Liu; Li; Ding (2021)<br>Cheng; Hu (2022) | Guo <i>et al.</i> (2019)            | Liu; Li; Ding (2021) ( <i>para emissões per capita</i> )                                                                                                                                                                                |
|                          | SO <sub>2</sub> (dióxido de enxofre)        |                                                                                                |                                     | Wang <i>et al.</i> (2022)                                                                                                                                                                                                               |
|                          | Emissões de GEE                             |                                                                                                |                                     | Hankey, S; Marshall, JD (2010)                                                                                                                                                                                                          |
| Densidade populacional   | CO <sub>2</sub> (gás carbônico)             | Li; Deng; Peng (2020) ( <i>para emissões residenciais</i> )                                    |                                     | Glaeser; Kahn (2010)*<br>Lee; Lee (2014)<br>Gudipudi <i>et al.</i> (2016)<br>Su (2017)<br>Lee; Lee (2020)<br>Li; Deng; Peng (2020)<br>Castells-Quintana; Dienesch; Krause (2021)<br>Yi <i>et al.</i> (2021)<br>Guo <i>et al.</i> (2022) |
|                          | SO <sub>2</sub> (dióxido de enxofre)        |                                                                                                | Wang <i>et al.</i> (2022)           | Hilber; Palmer (2014)                                                                                                                                                                                                                   |
|                          | NO <sub>2</sub> (dióxido de nitrogênio)     | Borck; Schrauth (2021)                                                                         |                                     | Hilber; Palmer (2014)*                                                                                                                                                                                                                  |
|                          | O <sub>3</sub> (ozônio)                     |                                                                                                |                                     | Borck; Schrauth (2021)                                                                                                                                                                                                                  |
|                          | PM <sub>2.5</sub>                           | Borck; Schrauth (2021)<br>Carrozzi; Roth (2023)                                                |                                     | Castells-Quintana; Dienesch; Krause (2021)                                                                                                                                                                                              |
|                          | PM <sub>10</sub>                            | Borck; Schrauth (2021)                                                                         |                                     | Hilber; Palmer (2014)                                                                                                                                                                                                                   |
|                          | Índice agregado de má qualidade do ar [AQI] | Borck; Schrauth (2021)                                                                         |                                     |                                                                                                                                                                                                                                         |
|                          |                                             |                                                                                                |                                     |                                                                                                                                                                                                                                         |

<sup>1</sup>Variável investigada: tamanho da cidade/nível de urbanização

\*Artigos não contemplados pelo *Method Ordinatio*, porém identificados como relevantes em análise posterior

Fonte: Elaboração própria

### APÊNDICE 1.B. Moldura teórica detalhada

A análise apresentada nesta seção baseia-se em Borck e Tabuchi (2019), que se baseiam em um modelo padrão de cidade monocêntrica simétrica, em que as pessoas trabalham, consomem bens e habitação nas cidades. Por um lado, há externalidades de aglomeração que tornam as pessoas mais produtivas nas grandes cidades. Por outro lado, um subproduto da vida urbana é a poluição, cujas externalidades não são internalizadas. Distingue-se a poluição em dois tipos: poluição puramente local, a qual mantém-se restrita a certas localidades, e poluição global, que se espalha entre as cidades, a exemplo dos gases de efeito estufa.

Considera-se uma economia com  $m$  cidades. Em cada cidade, o tamanho da população,  $n$ , é endógeno, enquanto a população total  $N$  é exógena, de tal forma que  $n = N/m$ . Cada cidade é caracterizada por um Distrito Comercial Central (*Central Business District - CBD*) e uma fronteira endógena denotada por  $\bar{x}$ . Todos os indivíduos viajam para o CBD e têm preferências idênticas.

$$U(s, z, E) = s^\alpha z^{1-\alpha} E^{-\beta} \quad (B\ 1)$$

em que  $s$  é a quantidade consumida de habitação,  $z$  é a quantidade consumida de uma cesta composta de bens exceto habitação e  $E$  é a externalidade negativa advinda da poluição. Os consumidores maximizam suas utilidades sujeitos à seguinte restrição orçamentária:

$$w = z + rs + tx \quad (B\ 2)$$

em que  $w$  é a renda salarial,  $r$  é o preço habitacional por metro quadrado (o aluguel), o preço dos outros bens é 1,  $t$  é o custo de deslocamento por quilômetro e  $x$  é a distância percorrida até o *CBD*. Após a maximização da utilidade, sujeita à restrição orçamentária, o consumo habitacional ótimo e o consumo da cesta  $z$  são, respectivamente

$$s^*(w - tx, r) = \frac{\alpha(w - tx)}{r} \quad (B\ 3)$$

$$z^*(w - tx, r) = (1 - \alpha)(w - tx) \quad (B\ 4)$$

Considerando que os trabalhadores têm mobilidade entre e dentro das cidades e que o terreno é alugado àquele que oferece o valor mais alto de aluguel, o máximo valor que uma família estaria disposta a pagar por unidade de terra pode ser obtido ao substituir as equações

(B 3) e (B 4) em (B 1) e resolver para  $\bar{u}$ . Tal valor, denominado na literatura por *household bid rent*, é dado por:

$$r(w - tx, E, v) = (w - tx)^{1/\alpha} E^{-\beta/\alpha} v^{-1/\alpha} \quad (B 5)$$

em que  $v \equiv \alpha^{-\alpha} (1 - \alpha)^{-(1-\alpha)} \bar{u}$ . Portanto, o aluguel oferecido depende do salário, do custo de deslocamento até o CBD e da poluição.

Conforme mostram Borck e Tabuchi (2019), são duas condições de equilíbrio espacial em uma cidade representativa. Primeiro, na fronteira da cidade, o aluguel habitacional será igual ao aluguel da terra agrícola (ou custo de oportunidade da terra), representado por  $r_A$ .

$$r(w - t\bar{x}, E, v) = r_A \quad (B 6)$$

Adicionalmente, a população  $n$  pertence à cidade entre 0 e  $\bar{x}$ , de tal forma que fronteira da cidade  $\bar{x}$  resolve a restrição populacional total dada por

$$\int_0^{\bar{x}} \frac{1}{s(w - tx, E, v)} dx = n \quad (B 7)$$

em que  $\frac{1}{s}$  é a densidade populacional em  $x$ , tal que  $n$  é a população total que cabe em uma fronteira  $x$ .

Assumindo que a produção  $Y$  em cada cidade é caracterizada por economias externas de escala que capturam efeitos de aglomeração, por exemplo por conta de ganhos associados à especialização individual, tem-se que  $Y = n^{1+\gamma}$ , com  $\alpha > \gamma > 0$  para assegurar que, na ausência de poluição, a utilidade é função inversa (U invertido) do tamanho da cidade, de tal forma que o tamanho ótimo da cidade sem poluição seja finito. O salário individual é  $w = n^\gamma$ , forma funcional fundamentada por diversos mecanismo, tais como ganhos advindos de especialização, da correspondência (*matching*), da partilha de insumos intermédios ou da aprendizagem (Borck; Tabuchi, 2019).

Utilizando a definição de  $w = n^\gamma$  e substituindo as equações (B3), (B5) e (B6) em (B7), encontra-se a fronteira de equilíbrio

$$\bar{x} = \frac{n^\gamma [1 - r_A^\alpha (r_A + tn)^{-\alpha}]}{t} \quad (B 8)$$

ou seja, a cidade cresce com a população e a fronteira ( $\bar{x}$ ) não é afetada diretamente pela poluição, mas indiretamente pela mudança populacional migração por meio da migração entre cidades.

Para resolver completamente o equilíbrio, (B 5) e (B 6) podem ser substituídos em  $\bar{x}$ , de tal forma que a utilidade indireta é dada por

$$v = n^\gamma (r_A + tn)^{-\alpha} E^{-\beta} \quad (B 1)$$

Esse resultado mostra o *trade-off* do mercado induzido pelo crescimento populacional: por um lado, a utilidade aumenta devido às forças de aglomeração; por outro lado, ela diminui devido às maiores distâncias de deslocamento e à competição por terras, que resulta em níveis mais elevados de aluguel.

Este modelo permite identificar a população de equilíbrio ao nível da cidade, utilizando a condição de migração que se baseia no diferencial de utilidade indireta  $v(n_i) - v(n_j)$ .

Considerando a poluição como um fenômeno global que afeta a utilidade, mas não afeta as escolhas de localização, o nível de poluição  $E$  é o mesmo em todas as cidades e o diferencial de utilidade na cidade  $i$  versus  $j$  fica

$$v(n_i) - v(n_j) = n_i^\gamma (r_A + tn_i)^{-\alpha} E^{-\beta} - n_j^\gamma (r_A + tn_j)^{-\alpha} E^{-\beta} \quad (B 10)$$

Sendo  $\hat{v}(n_i) \equiv n_i^\gamma (r_A + tn_i)^{-\alpha}$ , temos

$$v(n_i) - v(n_j) = E^{-\beta} (\hat{v}(n_i) - \hat{v}(n_j)) \quad (B 11)$$

Assim, para  $E > 0$ , a decisão individual de migração é determinada pela diferença  $\hat{v}(n_i) - \hat{v}(n_j)$ , portanto a poluição global não afeta as decisões de migração.

Seja  $\hat{n}$  o tamanho da cidade que resolve a maximização  $\max_n \hat{v}(n)$ , tem-se que o nível populacional que resolve  $\hat{v}'(n) = 0$  é  $\hat{n}$ , o ponto de máximo da função  $\hat{v}(n)$ :

$$\hat{n} = \frac{\gamma r_A}{(\alpha - \gamma)t} \quad (B 12)$$

Se  $\hat{v}'(n) > 0$ , os indivíduos têm incentivo para migrar para a cidade, levando a um equilíbrio instável. Portanto a condição para que o equilíbrio seja estável é que  $\hat{v}'(n) < 0$ , o que leva a um *continuum* de equilíbrios estáveis com tamanhos de cidades  $n_e > \hat{n}$  localizados na parte descendendo da função  $\hat{v}(n)$ .

Como notado por Borck e Tabuchi (2019), em linha com os achados de Henderson (1974), a população de equilíbrio ( $\hat{n}$ ) não é necessariamente igual ao tamanho ótimo da cidade (aqui denominado por  $n^*$ ). O tamanho ótimo é derivado a partir da ideia de um planejador central que maximiza o bem-estar agregado:  $m \cdot n \cdot v(n)$  com relação a  $n$  e  $m$ . Como  $m \cdot n = N$  é exógeno, maximizar o bem-estar agregado é equivalente a maximizar  $v(n)$  em relação a  $n$ , o

que resulta no tamanho ótimo  $n^*$ . Ao resolver  $\max_n v(n) = \hat{v}(n)E(n)^{-\beta}$  pode-se concluir que a elasticidade da utilidade privada com respeito à população deve ser igual à elasticidade das emissões totais multiplicada pelo dano marginal das emissões:

$$\frac{\hat{v}(n)}{v(n)} = \beta \frac{E'(n)}{E(n)} \quad (B 13)$$

Sabemos que  $n_e > \hat{n}$  devido à condição para o equilíbrio estável e que  $\hat{n}$  é o nível populacional que maximiza  $\hat{v}(n)$ . Sendo  $\hat{v}(n) = n^\gamma(r_A + tn)^{-\alpha}$ , podemos derivar  $\hat{v}(n)$  em relação a  $n$  e dividir por  $v(n)$  para encontrar:

$$\frac{\hat{v}'(n)}{v(n)} = \frac{\gamma(r_A + tn^*) - \alpha n^*}{n^*(r_A + tn^*)} \quad (B 14)$$

Da equação (B 12) temos que

$$\gamma r_A = \hat{n} \alpha t - \hat{n} \gamma t \quad (B 15)$$

Substituindo (B 14) e (B 15) em (B 13), podemos concluir que

$$\frac{(\hat{n} - n^*)t(\alpha - \gamma)}{n^*(r_A + tn^*)} = \beta \frac{E'(n)}{E(n)} \quad (B 16)$$

Como  $\beta > 0$ ,  $E(n) > 0$  e  $\alpha > \gamma$ , há dois cenários possíveis:

(i)  $E'(n) > 0 \Rightarrow (\hat{n} - n^*) > 0 \Rightarrow \hat{n} > n^*$ : ou seja, população de equilíbrio será maior que a população ótima ( $\hat{n} > n^*$ ), se  $E'(n) > 0$ . Como  $E(n) = m \cdot e(n) = \frac{N}{n} \cdot e(n)$ , as cidades serão muito grandes se a poluição per capita  $\frac{e(n)}{n}$  for crescente com o tamanho da cidade.

(ii)  $E'(n) < 0 \Rightarrow (\hat{n} - n^*) < 0 \Rightarrow \hat{n} < n^*$ : conforme ressaltado Borck e Tabuchi (2019), isto abre a possibilidade de que, no equilíbrio, as cidades sejam muito pequenas (menores do que o socialmente ótimo). De todo modo, uma vez que há um continuum de equilíbrio com  $n^e > \hat{n}$ , as cidades também podem ser muito grandes neste cenário de emissões per capita decrescentes em relação ao tamanho da cidade.

Portanto os autores concluem que, se a poluição é global e se as emissões per capita aumentam com  $n$ , então as cidades tendem a ser muito grandes no equilíbrio. No entanto, se as emissões per capita declinarem com  $n$ , as cidades podem tanto ser muito pequenas quanto muito grandes no equilíbrio.

Seguindo a proposta realizada em Castells-Quintana, Dienesch e Krause (2021b), utilizaremos a relação entre poluição e população concebida a partir do modelo *IPAT*. Para efeitos de notação, o  $I$  da equação será denominado  $e(n)$ , o qual representa as emissões totais de cada cidade, e  $P$  será identificado por  $n$ , de tal forma que a relação *IPAT* pode ser reescrita

em seu modo estocástico como  $e(n) = n^\theta A^\varphi T^\mu$ . Assim, retomando a expressão de poluição no sistema de cidades, temos que

$$E(n) = me(n) = mn^\theta A^\varphi T^\mu = \frac{N}{n} n^\theta A^\varphi T^\mu = Nn^{\theta-1} A^\varphi T^\mu \quad (B\ 17)$$

$$E'(n) = N(\theta - 1)n^{\theta-2} A^\varphi T^\mu \quad (B\ 18)$$

do que se pode concluir que  $E'(n) > 0$  se  $(\theta - 1) > 0$  ou  $\theta > 1$ .

Substituindo (B 17) e (B 18) em (B 13) e (B 14), temos que

$$\frac{\gamma(r_A + tn^*) - \alpha tn^*}{n^*(r_A + tn^*)} = \frac{\beta N(\theta - 1)n^{*\theta-2} A^\varphi T^\mu}{Nn^{*\theta-1} A^\varphi T^\mu}$$

$$\frac{\gamma r_A + \gamma tn^* - \alpha tn^*}{n^*(r_A + tn^*)} = \frac{\beta(\theta - 1)}{n} = \beta\theta - \beta$$

o que, com as devidas simplificações, resulta em

$$n^* = \frac{r_A(\gamma + \beta(1 - \theta))}{t(\alpha - \gamma - \beta(1 - \theta))} \quad (B\ 19)$$

Como temos de (B 12) que  $\hat{n} = \frac{\gamma r_A}{(\alpha - \gamma)t}$ , a comparação entre o tamanho de equilíbrio ( $\hat{n}$ ) das cidades e o tamanho ótimo ( $n^*$ ) depende dos parâmetros  $\alpha$  (a parcela das despesas com habitação),  $\gamma$  (a elasticidade da aglomeração ou economias de escala) e  $\beta$  (a desutilidade da poluição). Seguindo a literatura, pode-se definir  $\alpha = 0,21$  (de acordo com (ALMEIDA; AZZONI; TABOSA, 2019),  $\gamma = 0,05$  (de acordo com Combes e Gobillon, 2015) e  $\beta = 0,022$  (de acordo com Borck e Tabuchi, 2019). Neste caso, a população de equilíbrio das cidades é maior que o ótimo ( $\hat{n} - n^* > 0$ ) para qualquer valor de  $\theta > 1$  e valores positivos de aluguel e custos de deslocamento.

Assim, como notado por Borck e Tabuchi (2019), que confirmam observação de Henderson (1974), a população de equilíbrio não é necessariamente igual ao tamanho ótimo da cidade, o qual é derivado da maximização da utilidade indireta em relação à população. Neste contexto, os autores concluem que, se a poluição é global e se as emissões per capita aumentam com  $n$ , então as cidades tendem a apresentar tamanhos acima do eficiente no equilíbrio, em termos populacionais. No entanto, se as emissões per capita declinarem com  $n$ , as cidades podem tanto ser muito pequenas quanto muito grandes no equilíbrio. A definição da elasticidade da poluição em relação à população é, portanto, crucial na análise do tamanho das cidades.



## APÊNDICE 1.C. Dados e resultados adicionais

**Tabela 1.C-1:** Matriz de correlação de Pearson – principais variáveis em 1991

|                                    | Emissões Urbanas de GEE | Emissões Urbanas de GEE per capita | População Total | População Urbana | Urbanização | Área urbana | Densidade Urbana | PIB per capita |
|------------------------------------|-------------------------|------------------------------------|-----------------|------------------|-------------|-------------|------------------|----------------|
| Emissões Urbanas de GEE            | 1                       |                                    |                 |                  |             |             |                  |                |
| Emissões Urbanas de GEE per capita | 0,400***                | 1                                  |                 |                  |             |             |                  |                |
| População Total                    | 0,855***                | 0,008                              | 1               |                  |             |             |                  |                |
| População Urbana                   | 0,846***                | 0,008                              | 0,998***        | 1                |             |             |                  |                |
| Urbanização                        | 0,149***                | 0,089***                           | 0,169***        | 0,183***         | 1           |             |                  |                |
| Área urbana                        | 0,795***                | 0,014                              | 0,934***        | 0,929***         | 0,256***    | 1           |                  |                |
| Densidade Urbana                   | -0,012                  | -0,029                             | -0,008          | -0,007           | -0,085***   | -0,051***   | 1                |                |
| PIB per capita                     | 0,103***                | 0,088***                           | 0,092***        | 0,098***         | 0,300***    | 0,132***    | -0,080***        | 1              |

Fonte: Elaboração própria

**Tabela 1.C-2:** Matriz de correlação de Pearson – principais variáveis em 2000

|                                    | Emissões Urbanas de GEE | Emissões Urbanas de GEE per capita | População Total | População Urbana | Urbanização | Área urbana | Densidade Urbana | PIB per capita |
|------------------------------------|-------------------------|------------------------------------|-----------------|------------------|-------------|-------------|------------------|----------------|
| Emissões Urbanas de GEE            | 1                       |                                    |                 |                  |             |             |                  |                |
| Emissões Urbanas de GEE per capita | 0,488***                | 1                                  |                 |                  |             |             |                  |                |
| População Total                    | 0,767***                | 0,011                              | 1               |                  |             |             |                  |                |
| População Urbana                   | 0,770***                | 0,012                              | 0,999***        | 1                |             |             |                  |                |
| Urbanização                        | 0,161***                | 0,084***                           | 0,166***        | 0,182***         | 1           |             |                  |                |
| Área urbana                        | 0,713***                | 0,028                              | 0,916***        | 0,917***         | 0,273***    | 1           |                  |                |
| Densidade Urbana                   | 0,015                   | -0,039*                            | 0,036*          | 0,036*           | -0,097***   | -0,037*     | 1                |                |
| PIB per capita                     | 0,300***                | 0,379***                           | 0,116***        | 0,124***         | 0,339***    | 0,193***    | -0,189***        | 1              |

Fonte: Elaboração própria

**Tabela 1.C-3:** Matriz de correlação de Pearson – principais variáveis em 2010

|                                    | Emissões Urbanas de GEE | Emissões Urbanas de GEE per capita | População Total | População Urbana | Urbanização | Área urbana | Densidade Urbana | PIB per capita |
|------------------------------------|-------------------------|------------------------------------|-----------------|------------------|-------------|-------------|------------------|----------------|
| Emissões Urbanas de GEE            | 1                       |                                    |                 |                  |             |             |                  |                |
| Emissões Urbanas de GEE per capita | 0,305***                | 1                                  |                 |                  |             |             |                  |                |
| População Total                    | 0,840***                | 0,008                              | 1               |                  |             |             |                  |                |
| População Urbana                   | 0,840***                | 0,01                               | 0,999***        | 1                |             |             |                  |                |
| Urbanização                        | 0,209***                | 0,167***                           | 0,164***        | 0,176***         | 1           |             |                  |                |
| Área urbana                        | 0,826***                | 0,035*                             | 0,903***        | 0,899***         | 0,273***    | 1           |                  |                |
| Densidade Urbana                   | 0,032*                  | -0,095***                          | 0,071***        | 0,070***         | -0,035*     | 0           | 1                |                |
| PIB per capita                     | 0,212***                | 0,253***                           | 0,107***        | 0,112***         | 0,297***    | 0,186***    | -0,160***        | 1              |

Fonte: Elaboração própria

**Tabela 1.C-4:** Testes com diferentes variáveis no nível das AMC's

|                                                        | <i>Variável Dependente:</i>                                                                                                    |                                            |                                            |                                                       |
|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
|                                                        | <i>Emissões urbanas de GEE<sup>a</sup></i>                                                                                     | <i>Emissões urbanas de GEE<sup>a</sup></i> | <i>Emissões urbanas de GEE<sup>a</sup></i> | <i>Emissões urbanas de GEE per capita<sup>a</sup></i> |
|                                                        | FE rob. (1)                                                                                                                    | FE rob. (2)                                | FE rob. (3)                                | FE rob. (4)                                           |
| População <sup>a</sup>                                 | 2,817***<br>(0,067)                                                                                                            | 2,785***<br>(0,068)                        | 2,745***<br>(0,070)                        |                                                       |
| Densidade Urbana <sup>a</sup>                          | -1,058***<br>(0,136)                                                                                                           | -0,928***<br>(0,182)                       | -0,859***<br>(0,168)                       | -0,052<br>(0,048)                                     |
| PIB per capita <sup>a</sup>                            | 0,373***<br>(0,023)                                                                                                            | 0,344***<br>(0,024)                        | -0,412***<br>(0,073)                       | 0,196***<br>(0,010)                                   |
| PIB per capita quadrático <sup>a</sup>                 |                                                                                                                                |                                            | 0,225***<br>(0,025)                        |                                                       |
| Partic. PIB industrial                                 |                                                                                                                                | 0,354***<br>(0,075)                        |                                            |                                                       |
| Urbanização                                            | 4,624***<br>(0,131)                                                                                                            | 4,505***<br>(0,134)                        | 4,804***<br>(0,134)                        | 1,674***<br>(0,057)                                   |
| Interação Densidade <sup>a</sup> x Concentração urbana | 0,083<br>(0,084)                                                                                                               | 0,075<br>(0,085)                           | 0,134<br>(0,084)                           | -0,140***<br>(0,036)                                  |
| Interação Densidade <sup>a</sup> x Nordeste            | 0,617***<br>(0,138)                                                                                                            | 0,488***<br>(0,188)                        | 0,377**<br>(0,174)                         | 0,006<br>(0,050)                                      |
| Interação Densidade <sup>a</sup> x Norte               | 0,131<br>(0,229)                                                                                                               | 0,515***<br>(0,190)                        | 0,492***<br>(0,176)                        | -0,174***<br>(0,052)                                  |
| Interação Densidade <sup>a</sup> x Sudeste             | 0,645***<br>(0,138)                                                                                                            | 0,327<br>(0,200)                           | 0,260<br>(0,185)                           | -0,121**<br>(0,057)                                   |
| Interação Densidade <sup>a</sup> x Sul                 | 0,447***<br>(0,150)                                                                                                            | -0,111<br>(0,230)                          | -0,190<br>(0,218)                          | -0,169***<br>(0,064)                                  |
| Observações                                            | 12.804                                                                                                                         | 12.804                                     | 12.804                                     | 12.804                                                |
| R <sup>2</sup>                                         | 0,599                                                                                                                          | 0,601                                      | 0,622                                      | 0,322                                                 |
| R <sup>2</sup> Ajustado                                | 0,398                                                                                                                          | 0,400                                      | 0,432                                      | -0,018                                                |
| <i>Notas:</i>                                          | Erros-padrão usual e robusto entre parênteses,<br>*p<0,1; **p<0,05; ***p<0,01<br><sup>a</sup> Variáveis em termos logarítmicos |                                            |                                            |                                                       |

Fonte: Elaboração própria

**Tabela 1.C-5:** Estimacões no nível das microrregiões – POLS, EF e EA*Variável Dependente: Emissões urbanas de GEE<sup>a</sup>*

|                                                           | POLS usual           | POLS rob.            | FE usual             | FE rob.             | RE usual             | RE rob.              |
|-----------------------------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|----------------------|----------------------|
|                                                           | (1)                  | (2)                  | (3)                  | (4)                 | (5)                  | (6)                  |
| População <sup>a</sup>                                    | 0,994***<br>(0,029)  | 0,994***<br>(0,029)  | 2,910***<br>(0,162)  | 2,910***<br>(0,239) | 0,994***<br>(0,029)  | 0,994***<br>(0,029)  |
| Densidade Urbana <sup>a, b</sup>                          | -0,519***<br>(0,051) | -0,519***<br>(0,049) | -1,272***<br>(0,289) | -1,272**<br>(0,631) | -0,519***<br>(0,051) | -0,519***<br>(0,049) |
| PIB per capita <sup>a</sup>                               | 0,964***<br>(0,042)  | 0,964***<br>(0,044)  | 1,127***<br>(0,079)  | 1,127***<br>(0,169) | 0,964***<br>(0,042)  | 0,964***<br>(0,044)  |
| Partic. PIB industrial                                    | 0,129***<br>(0,017)  | 0,129***<br>(0,018)  | 0,287***<br>(0,036)  | 0,287***<br>(0,042) | 0,129***<br>(0,017)  | 0,129***<br>(0,018)  |
| Interação Densidade <sup>a, b</sup> x Concentração urbana | -0,080***<br>(0,012) | -0,080***<br>(0,011) | 0,201<br>(0,151)     | 0,201<br>(0,170)    | -0,080***<br>(0,012) | -0,080***<br>(0,011) |
| Interação Densidade <sup>a, b</sup> x Nordeste            | 0,153***<br>(0,023)  | 0,153***<br>(0,020)  | 0,733**<br>(0,306)   | 0,733<br>(0,612)    | 0,153***<br>(0,023)  | 0,153***<br>(0,020)  |
| Interação Densidade <sup>a, b</sup> x Norte               | 0,190***<br>(0,025)  | 0,190***<br>(0,022)  | 0,669*<br>(0,358)    | 0,669<br>(0,784)    | 0,190***<br>(0,025)  | 0,190***<br>(0,022)  |
| Interação Densidade <sup>a, b</sup> x Sudeste             | 0,089***<br>(0,021)  | 0,089***<br>(0,017)  | 0,449<br>(0,318)     | 0,449<br>(0,617)    | 0,089***<br>(0,021)  | 0,089***<br>(0,017)  |
| Interação Densidade <sup>a, b</sup> x Sul                 | -0,017<br>(0,022)    | -0,017<br>(0,018)    | -0,367<br>(0,349)    | -0,367<br>(0,628)   | -0,017<br>(0,022)    | -0,017<br>(0,018)    |
| Constante                                                 | -1,403***<br>(0,358) | -1,403***<br>(0,387) |                      |                     | -1,403***<br>(0,358) | -1,403***<br>(0,387) |
| Observações                                               | 1.665                |                      | 1.665                |                     | 1.665                |                      |
| R <sup>2</sup>                                            | 0,741                |                      | 0,705                |                     | 0,741                |                      |
| R <sup>2</sup> Ajustado                                   | 0,740                |                      | 0,555                |                     | 0,740                |                      |

Erros-padrão usual e robusto entre parênteses,  
 \*p<0,1; \*\*p<0,05; \*\*\*p<0,01

Notas:

<sup>a</sup>Variáveis em termos logarítmicos

<sup>b</sup>Densidade média da microrregião ponderada pela população

Fonte: Elaboração própria

**Tabela 1.C-6:** Estimacões no nível das mesorregiões – POLS, EF e EA

| <i>Variável Dependente: Emissões urbanas de GEE<sup>a</sup></i> |                      |                      |                      |                      |                      |                      |
|-----------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|                                                                 | POLS usual           | POLS rob.            | FE usual             | FE rob.              | RE usual             | RE rob.              |
|                                                                 | (1)                  | (2)                  | (3)                  | (4)                  | (5)                  | (6)                  |
| População <sup>a</sup>                                          | 0,977***<br>(0,070)  | 0,977***<br>(0,084)  | 2,412***<br>(0,359)  | 2,412***<br>(0,646)  | 0,977***<br>(0,070)  | 0,977***<br>(0,084)  |
| Densidade Urbana <sup>a, b</sup>                                | -0,374***<br>(0,116) | -0,374***<br>(0,126) | -1,724***<br>(0,396) | -1,724***<br>(0,544) | -0,374***<br>(0,116) | -0,374***<br>(0,126) |
| PIB per capita <sup>a</sup>                                     | 1,170***<br>(0,093)  | 1,170***<br>(0,085)  | 1,743***<br>(0,201)  | 1,743***<br>(0,198)  | 1,170***<br>(0,093)  | 1,170***<br>(0,085)  |
| Partic. PIB industrial                                          | 0,040***<br>(0,009)  | 0,040***<br>(0,008)  | 0,065***<br>(0,019)  | 0,065***<br>(0,020)  | 0,040***<br>(0,009)  | 0,040***<br>(0,008)  |
| Interação Densidade <sup>a, b</sup> x Concentração urbana       | -0,091***<br>(0,028) | -0,091***<br>(0,024) | 0,862**<br>(0,398)   | 0,862*<br>(0,470)    | -0,091***<br>(0,028) | -0,091***<br>(0,024) |
| Interação Densidade <sup>a, b</sup> x Nordeste                  | -0,049<br>(0,035)    | -0,049<br>(0,039)    | 0,225<br>(0,491)     | 0,225<br>(0,672)     | -0,049<br>(0,035)    | -0,049<br>(0,039)    |
| Interação Densidade <sup>a, b</sup> x Norte                     | -0,184***<br>(0,040) | -0,184***<br>(0,043) | -0,112<br>(0,535)    | -0,112<br>(0,719)    | -0,184***<br>(0,040) | -0,184***<br>(0,043) |
| Interação Densidade <sup>a, b</sup> x Sudeste                   | -0,281***<br>(0,043) | -0,281***<br>(0,044) | -0,896<br>(0,622)    | -0,896<br>(0,708)    | -0,281***<br>(0,043) | -0,281***<br>(0,044) |
| Interação Densidade <sup>a, b</sup> x Sul                       | -0,277***<br>(0,047) | -0,277***<br>(0,047) | 0,741<br>(1,067)     | 0,741<br>(1,318)     | -0,277***<br>(0,047) | -0,277***<br>(0,047) |
| Constante                                                       | -1,209<br>(0,819)    | -1,209<br>(1,105)    |                      |                      | -1,209<br>(0,819)    | -1,209<br>(1,105)    |
| Observações                                                     | 411                  |                      | 411                  |                      | 411                  |                      |
| R <sup>2</sup>                                                  | 0,748                |                      | 0,772                |                      | 0,748                |                      |
| R <sup>2</sup> Ajustado                                         | 0,742                |                      | 0,648                |                      | 0,742                |                      |

Erros-padrão usual e robusto entre parênteses,  
\*p<0,1; \*\*p<0,05; \*\*\*p<0,01

Notas:

<sup>a</sup>Variáveis em termos logarítmicos

<sup>b</sup>Densidade média da mesorregião ponderada pela população

Fonte: Elaboração própria

**Tabela 1.C-7:** Estimacões no nível das UF's – POLS, EF e EA*Variável Dependente: Emissões urbanas de GEE<sup>a</sup>*

|                                  | POLS usual           | POLS rob.            | FE usual             | FE rob.              | RE usual             | RE rob.              |
|----------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|                                  | (1)                  | (2)                  | (3)                  | (4)                  | (5)                  | (6)                  |
| População <sup>a</sup>           | 1,161 ***<br>(0,175) | 1,161 ***<br>(0,175) | 2,543 ***<br>(0,522) | 2,543 ***<br>(0,515) | 1,161 ***<br>(0,175) | 1,161 ***<br>(0,175) |
| Densidade Urbana <sup>a, b</sup> | -0,429*<br>(0,251)   | -0,429**<br>(0,170)  | -0,804**<br>(0,386)  | -0,804**<br>(0,373)  | -0,429*<br>(0,251)   | -0,429**<br>(0,170)  |
| PIB per capita <sup>a</sup>      | 0,695 ***<br>(0,199) | 0,695 **<br>(0,267)  | 2,247 ***<br>(0,339) | 2,247 ***<br>(0,363) | 0,695 ***<br>(0,199) | 0,695 **<br>(0,267)  |
| Partic. PIB industrial           | 0,001<br>(0,004)     | 0,001<br>(0,003)     | 0,017**<br>(0,007)   | 0,017***<br>(0,005)  | 0,001<br>(0,004)     | 0,001<br>(0,003)     |
| Constante                        | -3,254*<br>(1,934)   | -3,254*<br>(1,861)   |                      |                      | -3,254*<br>(1,934)   | -3,254*<br>(1,861)   |
| Observações                      | 81                   |                      | 81                   |                      | 81                   |                      |
| R <sup>2</sup>                   | 0,739                |                      | 0,898                |                      | 0,739                |                      |
| R <sup>2</sup> Ajustado          | 0,726                |                      | 0,837                |                      | 0,726                |                      |

Erros-padrão usual e robusto entre parênteses,  
 \*p<0,1; \*\*p<0,05; \*\*\*p<0,01

Notas:

<sup>a</sup>Variáveis em termos logarítmicos

<sup>b</sup>Densidade média da UF ponderada pela população

Fonte: Elaboração própria

## **2. Análise da forma urbana em concentrações brasileiras: métricas espaciais a partir de dados de sensoriamento remoto**

### **2.1. Introdução**

As características físicas das cidades variam em suas formas, as quais podem apresentar diversos padrões e ser influenciadas por fatores que vão desde características geomorfológicas até forças econômicas, sociais, ambientais, tecnológicas e políticas. Enquanto algumas cidades concentram-se em torno de um único núcleo central, outras apresentam múltiplos centros, e há aquelas que se estendem por vastas áreas. Essas características relacionadas ao formato das cidades podem impactar positiva ou negativamente uma variedade de aspectos socioeconômicos e sua compreensão é crucial para melhor entendimento das possibilidades de atuação governamental e consequências das políticas urbanas.

A forma urbana descreve a relação entre uma cidade específica e suas áreas rurais circundantes (Grimm *et al.*, 2008), assim como o impacto das atividades humanas no ambiente dentro e ao redor da cidade (Alberti, 2005; Weng *et al.*, 2007). E também está ligada aos padrões de transporte (Dieleman; Wegener, 2004). Um debate recorrente que explicita duas formas urbanas contrastantes diz respeito àquele que distingue entre a "dispersão urbana" comum nas cidades norte-americanas, e a "cidade compacta" mais comum na Europa (Frenkel; Ashkenazi, 2008). A "dispersão urbana" envolve a expansão significativa das cidades para áreas circundantes através da criação de novos subúrbios de baixa densidade com habitações isoladas ou semi-isoladas e grandes áreas comerciais (Schneider; Woodcock, 2008). Por outro lado, a "cidade compacta" representa o oposto da dispersão urbana, caracterizando-se por altas densidades e distâncias relativamente curtas. Muitas cidades europeias são vistas como exemplos de cidades compactas (Guerois; Pumain, 2008).

A forma urbana compacta tem sido defendida como um aspecto relevante em direção ao planejamento urbano sustentável, cujo objetivo principal seria acomodar o crescimento urbano enquanto minimiza o uso de áreas não desenvolvidas. Definir o que é a forma urbana, porém, é algo desafiador por suas múltiplas facetas. Uma análise conceitual detalhada do conceito revela suas variadas dimensões, bem como os desafios e problemas associados ao desenvolvimento urbano. Distinguir tais prismas pode ajudar a entender a diversidade dos desenvolvimentos urbanos e suas consequências, assim como identificar áreas que requerem intervenções. Embora se reconheça a inegável importância de cada perspectiva para o

entendimento da forma urbana, este trabalho terá como foco a construção de indicadores exclusivamente relacionados à estrutura física das cidades, por meio de conjunto de indicadores derivados das métricas de paisagem. Entende-se que este é um passo importante no entendimento da configuração urbana brasileira, viabilizado recentemente a partir da disponibilidade de informações, e que pode complementar outros indicadores já existentes que contemplam outras dimensões da forma urbana<sup>38</sup>.

Assim, o propósito deste trabalho é contribuir para a descrição da configuração das áreas urbanas no Brasil por meio da construção de uma base de dados que retrata aspectos espaciais da forma urbana. São utilizados mapas de classificação de uso e ocupação do solo para estimar indicadores derivados das métricas de paisagem que sintetizam características físicas como extensão, complexidade, centralidade e compacidade das áreas urbanas. Tais cálculos são estimados para a totalidade das 187 concentrações urbanas brasileiras definidas pelo IBGE nos anos de 1985, 1991, 2000, 2010, 2015 e 2022<sup>39</sup>, permitindo a caracterização da configuração urbana, sua evolução ao longo do tempo, bem como a comparação entre áreas urbanas distintas. Embora algumas iniciativas tenham se dedicado a entender a dinâmica espacial no Brasil, não há trabalhos e bases de dados sistematizadas que permitam construir indicadores de forma espacial para um grande conjunto de áreas urbanas e diversos pontos no tempo, lacuna que este trabalho visa preencher.

Para tanto, este artigo está organizado em 5 seções, sendo esta primeira introdutória. A seguir, discutem-se as abordagens relacionadas à definição e mensuração da forma urbana. A seção 3 traz os aspectos metodológicos da pesquisa e a seção 4 apresenta os resultados encontrados. Por fim, apontam-se as considerações finais na seção 5.

## **2.2. Definição e Mensuração da Forma Urbana**

Em termos amplos, a forma urbana refere-se à distribuição espacial das atividades humanas em um determinado local (Tsai, 2005), incluindo todos os elementos construídos, alterados, preservados ou mantidos pela ação humana (Bartuska; McClure, 2011). Kheirkhah e Mehr (2021) argumentam que a forma urbana é um conceito complexo e multifacetado,

---

<sup>38</sup> Em particular, indicadores tais como aqueles que relacionam população e emprego ao espaço ocupado, já foram alvos de outros trabalhos e podem vir a ser posteriormente relacionados à base de dados aqui construída.

<sup>39</sup> A escolha dos anos deve-se a múltiplos critérios. O inicial (1985) e o final (2022) correspondem aos anos de início e fim da disponibilidade de dados do MapBiomas no período de coleta das informações para o presente trabalho. Já os anos de 1991, 2000 e 2010 correspondem a anos em que há disponibilidade de dados do Censo-IBGE, o que permite o cruzamento de dados. Por fim, o ano de 2015 foi escolhido por ser um ano intermediário entre 2010 e 2022, o que pode ajudar a compreender a evolução dos fenômenos, bem como por ser um ano em que o IBGE também divulgou informações relacionadas à área urbana, o que permite a comparação dos dados.

influenciado por diversas questões econômicas, sociais, culturais e ambientais. Por décadas, as pesquisas econômicas que investigaram os efeitos da forma urbana e da maneira como as cidades expandem-se geralmente focalizaram certos elementos urbanos, especialmente a densidade. Embora a densidade seja significativa, existem outras dimensões importantes que podem influenciar as características urbanas e estas estão se tornando mais acessíveis com o uso crescente de imagens de satélite e sua análise computacional.

Na literatura, vários elementos e indicadores têm sido propostos para mensurar a forma urbana. Esses elementos podem ser avaliados de forma isolada ou combinada, utilizando diferentes métodos e em várias escalas espaciais (Tsai, 2005). A existência de uma vasta gama de indicadores para caracterizar a forma urbana fica evidente a partir da meta-síntese conduzida por Kheirkhah e Mehr (2021), a qual identifica e sistematiza as diferentes abordagens utilizadas pela literatura. O estudo seleciona 18 artigos de referência, a partir dos quais identifica 89 indicadores definidos na literatura para quantificar aspectos da forma urbana, que podem ser classificados em 14 conceitos e 5 categorias, abordados por meio de três diferentes escalas: cidade e área metropolitana (macro-escala), bairros (meso-escala) e blocos urbanos (micro-escala).

Embora não exaustivo, os indicadores sistematizados por Kheirkhah e Mehr (2021) trazem uma melhor compreensão das abordagens utilizadas na literatura para mensurar a forma urbana. Tomando como foco a macro-escala, ótica relevante quando o objetivo é de comparar diferentes áreas urbanas (cidades e áreas metropolitanas) em determinada região, as categorias identificadas foram (i) densidade, (ii) uso do solo, (iii) conectividade e (iv) configuração urbana. Tais categorias desdobram-se em 10 conceitos (como tipo de densidade, uso misto do solo e centralidade) e em 44 indicadores (densidade populacional, relação de hierarquia das vias, coeficiente de Moran, índice de compacidade, etc). O Quadro 2-1 apresenta todos os indicadores de forma urbana identificados por Kheirkhah e Mehr (2021), classificados segundo categorias e conceitos. A escolha do indicador (ou indicadores) a serem utilizados varia entre os estudos, segundo os objetivos, disponibilidade de informações e acesso a ferramentas e técnicas que possibilitam seus cálculos.

Alguns pesquisadores adotaram uma abordagem mais ampla para esses elementos e indicadores, como é o caso de Schwarz (2010), que examinou a forma urbana em cidades europeias e partiu da análise de 41 indicadores na escala da cidade. Schwarz (2010) aponta pelo menos duas abordagens distintas na literatura para medir a forma urbana: métricas de paisagem e indicadores socioeconômicos. As métricas de paisagem, criadas por ecologistas de paisagem,



identificam formas de paisagem através da análise de mapas de uso ou cobertura do solo, calculando parâmetros como fragmentação ou densidade de borda. Indicadores relacionados à população, como número de habitantes, densidade populacional ou área administrativa da cidade, também são discutidos na literatura para medir a forma urbana. A autora identifica, a partir de análises de correlações e análises fatoriais, que os indicadores de forma urbana mais relevantes para o conjunto das 231 cidades europeias analisadas foram (i) área do tecido urbano descontínuo; (ii) densidade de bordas; (iii) tamanho médio dos fragmentos; (iv) número de fragmentos; (v) índice de compactação do maior fragmento; (vi) número de população; e (vii) densidade populacional.

Assim como Schwarz (2010), nas últimas décadas diversos são os estudos que incorporam os aspectos relacionados à estrutura física aos indicadores socioeconômicos para retratar a forma urbana (Frenkel; Ashkenazi, 2008; Kasanko *et al.*, 2006; Tsai, 2005). Por exemplo, Galster *et al.* (2001) identificaram características como densidade, continuidade, concentração, aglomeração, centralidade, nuclearidade, usos mistos e proximidade como principais aspectos da forma urbana e tentaram quantificar esses conceitos. Angel *et al.* (2007), Angel *et al.* (2011) e Angel *et al.* (2016) usam imagens de satélite e suas possibilidades como fonte de informação para a criação de indicadores como densidade da área construída e da pegada urbana, centralidade medida pelo gradiente de densidade, índice de coesão e índice de proximidade como medidas de compacidade e métricas de fragmentação (índice de abertura, fragmentação do espaço aberto e novos empreendimentos). Pereira *et al.* (2013) propõem um índice de centralidade urbana (UCI) que utiliza variáveis como densidades de emprego e população para entender como a estrutura urbana varia de monocentricidade a policentricidade. O UCI é aplicado a quatro áreas metropolitanas: Pittsburgh, Los Angeles, São Paulo e Paris, e comparado com outras medidas tradicionais de aglomeração espacial.

Outros trabalhos concentram-se exclusivamente no uso do solo ou cobertura do solo para avaliar a estrutura física de uma cidade (Herold *et al.*, 2002). Neste contexto, destaca-se o abrangente estudo de Huang, Lu e Sellers. (2007), que utilizou imagens de satélite de 77 áreas metropolitanas na Ásia, EUA, Europa, América Latina e Austrália para calcular sete métricas espaciais que capturam cinco dimensões distintas da forma urbana (complexidade, centralidade, compacidade, porosidade e densidade). A comparação das métricas espaciais foi feita primeiramente entre países desenvolvidos e em desenvolvimento, e então entre regiões do mundo. Os resultados indicaram que as áreas urbanas nos países em desenvolvimento são mais

concentradas e têm maior densidade do que aquelas na Europa ou América do Norte. Adicionalmente, observaram-se notáveis variações na forma urbana entre diferentes regiões.

**Quadro 2-1:** As principais categorias, conceitos e indicadores da forma urbana em macro-escala – cidade e área metropolitana

| Categorias          | Conceitos                                                       | Indicadores                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|---------------------|-----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Densidade           | Tipo de Densidade                                               | Densidade populacional<br>Densidade da área urbana construída<br>Densidade de emprego                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|                     | Distribuição da Densidade (Distribuição de população e emprego) | Perfil e gradiente de densidade<br>Percentual da população em área de baixa densidade<br>Percentual da população em áreas com densidades médias e altas<br>Coeficiente de variação<br>Coeficiente de Gini<br>Índice Delta<br>Entropia de Shannon                                                                                                              |
| Uso do solo         | Uso misto do solo                                               | Equilíbrio e proporção de empregos para residentes<br>Grau de mistura de empregos (entropia)<br>Percentual de uso residencial e sua razão para usos não-residenciais<br>Razão entre área construída e espaço aberto<br>Porcentagem da área relacionada ao transporte: área recreativa, turística, comercial e industrial, e área construída para uso especial |
|                     | Acesso aos usos                                                 | Distância e tempo para chegar a estações de transporte público<br>Distância e tempo para chegar ao local de trabalho                                                                                                                                                                                                                                          |
| Conectividade       | Rede viária                                                     | Razão da hierarquia viária<br>Densidade da rede viária<br>Índice de congestionamento da rede viária<br>Número, Densidade e Razão de Interseções<br>Comprimento e Dimensão de Blocos                                                                                                                                                                           |
|                     | Infraestrutura de transporte                                    | Caminhos para pedestres e suas amenidades relacionadas nos principais corredores<br>Índice de rodovias, ferrovias e aviação<br>Proporção de uso de diversos tipos de sistemas de transporte                                                                                                                                                                   |
| Configuração urbana | Complexidade                                                    | Índice de forma<br>Borda média dos fragmentos e densidade de borda<br>Dimensão fractal<br>Soma dos perímetros de todos os fragmentos urbanos selados<br>Índice de forma média ponderada pela área                                                                                                                                                             |
|                     |                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|                     | Grau de agrupamento (Clustering)                                | Coeficiente de Moran<br>Coeficiente de Geary<br>Índice de agrupamento                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|                     | Centralidade e Nuclearidade                                     | Distância dos usos e da população em relação aos distritos centrais de negócios<br>Densidade populacional e de empregos em centros urbanos<br>Índice de centralidade<br>Número de núcleos e centros urbanos                                                                                                                                                   |
|                     |                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|                     | Compactação (compacidade) / Dispersão                           | Índice de compactação<br>Índice de compactação do maior fragmento<br>Índice de contágio<br>Tamanho médio dos fragmentos e número de fragmentos<br>Índice de <i>leapfrog</i> bruto e índice de <i>leapfrog</i> líquido<br>Índice de continuidade da terra desenvolvível com áreas urbanas                                                                      |

Fonte: Kheirkhah e Mehr (2021)

No Brasil, um trabalho relativamente abrangente que visa, dentre outros objetivos, compreender as dinâmicas urbanas e os complexos processos de mobilidade e integração nas aglomerações urbanas brasileiras é o desenvolvido por Ojima (2007). O autor desenvolve um indicador sintético de dispersão urbana, o qual considera dimensões sociais e espaciais como densidade, fragmentação, orientação e centralidade em 37 aglomerações urbanas brasileiras. O estudo baseou-se nas informações espaciais relacionadas aos setores censitários urbanos e restringe-se ao Censo Demográfico de 2000. A análise compara diferentes aglomerações urbanas em termos de dispersão e também aborda a correlação entre dispersão urbana e fatores como mobilidade pendular e utilização de transporte individual, mostrando como áreas mais dispersas tendem a ter uma maior dependência de automóveis. Os indicadores são utilizados para classificar as aglomerações urbanas brasileiras, destacando variações regionais, como o fato de que aglomerações no Sul e Sudeste tendem a ser mais dispersas do que aquelas no Norte e Nordeste.

Especificamente relacionados ao uso do solo, os trabalhos aplicados para a realidade brasileira são limitados, seja quanto às localidades compreendidas, seja quanto ao referencial temporal. Souza (2023) utiliza dados de sensoriamento remoto e geoprocessamento para identificar e modelar os processos de alterações espaço-temporais na região dos Lençóis Maranhenses. Dentre as aplicações, incluiu-se o cálculo dos Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e Índice de Diferença Normalizada da Água (NDWI). O trabalho avalia trinta e seis anos de dados de uso e cobertura da terra e identifica aumento da expansão urbana sobre corpos hídricos, avanço do campo de dunas móveis sobre áreas de povoamento e aumento das áreas de pastagens resultando em um processo dinâmico de ocupação do território ao longo das últimas décadas na região dos Lençóis Maranhenses. Fonseca, Ribas e Moura (2016) analisam o município de São Gonçalo do Rio Abaixo, no Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais. A metodologia adotada envolveu a classificação de imagens de satélite *RapidEye* e o mapeamento do uso e cobertura do solo; a aplicação de métricas de paisagem (como área, perímetro, distância até o vizinho mais próximo, área central, índice de forma e NRVI); e a integração dessas métricas por meio de análise multicritério.

Um período longo (1960-2019) também é analisado em outro trabalho recente (Chelotti; Sano, 2023) para compreender o padrão espacial da expansão urbana do Distrito Federal. A análise da evolução da mancha urbana foi realizada por métricas de paisagem baseadas em fragmentos e complementada com dados topográficos e de normas sobre limites de crescimento urbano. Identifica-se que o Distrito Federal ainda apresenta expansão urbana acelerada e sem

tendência de redução dessa expansão. A taxa média anual de crescimento de urbanização foi de 11,43 km<sup>2</sup>/ano, porém foi superior a 20 km<sup>2</sup>/ano a partir de 2013. A expansão da mancha urbana ocorreu em ciclos de fragmentação e adensamento, sendo que o período de 2013 a 2019 com maior crescimento e fragmentação. Declividades superiores a 30% e normas de limites de crescimento urbano associadas com áreas ambientalmente protegidas têm exercido forte influência no direcionamento do crescimento da mancha urbana. Entretanto, percebe-se perda de eficiência dos instrumentos governamentais, a partir de 2013.

As métricas de paisagem também foram utilizadas por De Barros (2018) para avaliar as mudanças na paisagem urbana em Cuiabá, Brasil, entre 1980 e 2010. Indicadores como área, densidade e tamanho de fragmentos, forma, vizinho mais próximo e complexidade foram calculados por meio do software Fragstats, com base na interpretação de imagens *Landsat*. Essas métricas ajudaram a descrever as transformações na estrutura da paisagem provocadas pela urbanização. Os resultados indicaram que a área dos fragmentos de vegetação diminuiu em 20,4% ao longo desses 30 anos, com a maior redução ocorrendo entre 1980 e 1995. A paisagem tornou-se ecologicamente mais fragmentada e menos complexa, em decorrência da linearização da forma urbana, caracterizada por quadras regulares e espaços verdes cultivados, como parques urbanos, jardins e ruas, resultantes das intervenções humanas na estrutura da paisagem.

Pode-se depreender da literatura apresentada que os estudos que exploram a configuração espacial e uso do solo vêm ganhando relevância entre as análises relacionadas à forma urbana nos últimos anos, especialmente com a maior disponibilidade de informações e do desenvolvimento de tecnologia com softwares abertos que permitem seu processamento adequado. No Brasil, no entanto, os estudos desta natureza ainda são restritos a localidades específicas e/ou limitados a determinado período. Atualmente, a maior disponibilidade de informações sobre o uso do solo possibilita comparações entre um conjunto abrangente de áreas urbanas e ao longo do tempo, representando uma oportunidade para que os avanços nessa área se tornem mais sólidos. Este trabalho busca contribuir para essa agenda de pesquisa.

### **2.3. Metodologia**

A metodologia deste estudo divide-se em (i) explorar as possibilidades de utilização das métricas da paisagem para mensurar a forma urbana; (ii) descrever o uso de dados de sensoriamento remoto e as bases de dados disponíveis no Brasil; (iii) delimitar as escolhas

metodológicas realizadas quanto à base de dados e os indicadores selecionados, bem como os tratamentos realizados.

### 2.3.1. Métricas da Paisagem e Forma Urbana

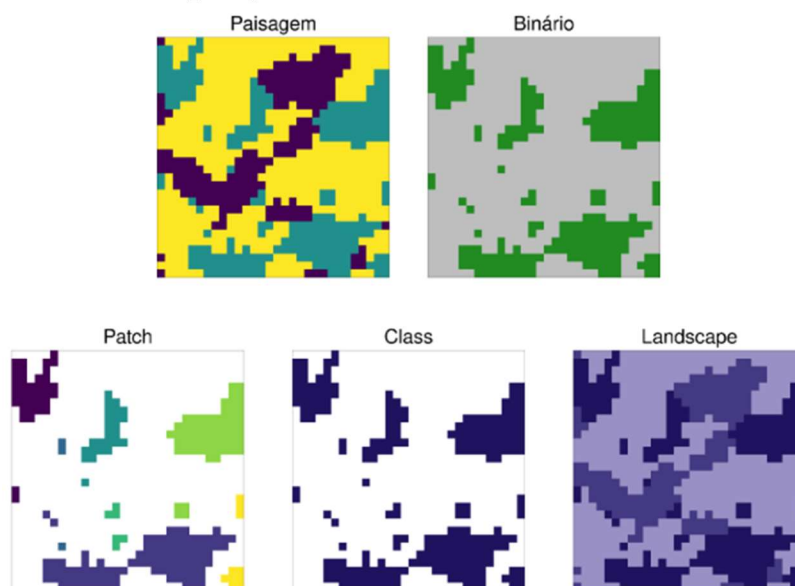
As métricas de paisagem (*landscape metrics*), amplamente empregadas na ecologia para analisar a fragmentação de habitats, biodiversidade e epidemiologia, evoluíram para diversas disciplinas desde o trabalho de O'Neill *et al.* (1988). No contexto urbano, as análises são importantes para elucidar os padrões urbanos e temporais de desenvolvimento, bem como avaliar, por exemplo, se as mudanças nas políticas de uso do solo influenciaram o favorecimento de determinados tipos de crescimento urbano (Kaza, 2013). Para fins de análise morfológica, uma paisagem descrita a partir de padrões binários pode ser segmentada em categorias, tais como núcleo, ilhota, laço, ponte, perfuração, borda e ramificação (Soille; Vogt, 2009). Tais classificações são utilizadas para mensurar a estrutura da paisagem. Ou seja, os algoritmos utilizam tais informações para quantificar a estrutura espacial (característica) da paisagem para uma área geográfica.

Ao discorrer sobre a definição de paisagem (*landscape*), McGarigal e Marks (1995) observam que existem muitas interpretações diferentes do termo, mas que invariavelmente incluem uma área de terra contendo um mosaico de fragmento (*patches*) ou elementos da paisagem. Os autores sugerem que existem várias maneiras apropriadas de definir paisagem, dependendo da situação analisada. O ponto crucial é que uma paisagem não é necessariamente determinada pelo seu tamanho, mas por um mosaico interativo de fragmentos que são relevantes para o fenômeno em estudo (em qualquer escala). O pesquisador ou gestor deve definir a paisagem de maneira adequada. Para Metzger (2001), a paisagem é um mosaico heterogêneo formado por unidades interativas, sendo esta heterogeneidade existente para pelo menos um fator, segundo um observador e numa determinada escala de observação.

E o que seriam esses fragmentos (manchas ou *patches*) de que trata a definição de paisagem? Os *patches* são elementos básicos ou unidades que compõem uma paisagem. Assim como a paisagem, as manchas que a compõem não são auto evidentes; elas devem ser definidas em relação à situação dada. De uma perspectiva ecológica, as manchas representam áreas relativamente discretas (domínio espacial) ou períodos (domínio temporal) de condições ambientais relativamente homogêneas, onde os limites das manchas são distinguidos por discontinuidades nos estados de caráter ambiental de magnitudes que são percebidas ou relevantes para o organismo ou fenômeno ecológico em consideração (Wiens, 1976). Já as

classes são compostas pelos fragmentos de mesmo tipo dentro de uma paisagem, definidas a partir da classificação do solo do mapa em questão (Figura 2-1).

**Figura 2-1:** Níveis das métricas de paisagem



Fonte: *landscapemetrics*, McGarigal e Marks (1995), Hesselbarth *et al.* (2019)

Portanto os fragmentos (manchas ou *patches*) podem ser entendidos como áreas contíguas de uma mesma categoria e as métricas são usadas para descrever a forma, composição e configuração desses fragmentos (Kaza, 2013). Em relatório sobre o programa FRAGSTATS, software desenvolvido para quantificar a estrutura da paisagem, McGarigal e Marks (1995) descrevem a ampla variedade de métricas de paisagem disponíveis, a aplicação ecológica e limitações de cada métrica. Avanços computacionais mais recentes permitem que as mesmas métricas calculadas no FRAGSTATS possam ser realizadas pelo pacote do R chamado *landscapemetrics*, a partir de padrões de paisagem categóricos. O pacote oferece um fluxo de trabalho reproduzível para análise de paisagens em um único ambiente<sup>40</sup>, além de permitir o cálculo de algumas outras métricas de complexidade de paisagem (Hesselbarth *et al.*, 2019).

O pacote *landscapemetrics* fornece 133 métricas, distribuídas em 5 tipos diferentes: (i) métricas de agregação (*aggregation metrics*); (ii) métricas de área e borda (*area and edge metric*), (iii) métrica de complexidade (*complexity metric*), (iv) métricas de área central (*core area metric*), (v) métricas de diversidade (*diversity metric*) e (vi) métricas de forma (*shape metric*). Os cálculos podem ser feitos a partir de três diferentes níveis: fragmento (*patch*), classe (*class*) e paisagem (*landscape*). A Tabela 2.B-2 traz uma lista com as 133 métricas disponíveis

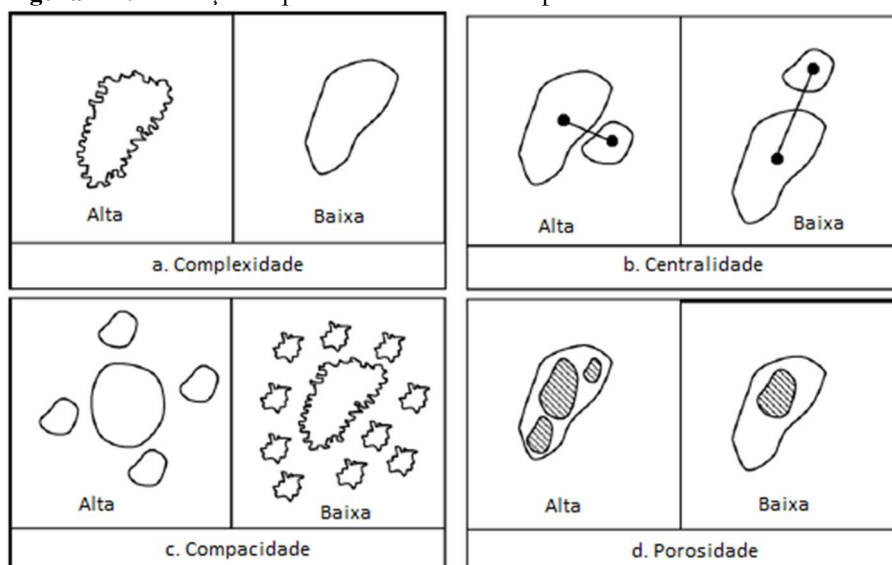
<sup>40</sup> O *landscapemetrics* suporta *terra* e *stars*, e aceita objetos espaciais *SpatRaster* ou *stars* como argumentos de entrada. Todas as funções podem ser usadas em um fluxo de trabalho encadeado, pois sempre recebem os dados como primeiro argumento e retornam um *tibble*.

no pacote *landscapemetrics*, por nível e tipo de métrica. Diante do elevado número de métricas disponíveis, é importante delimitar aquelas que podem ser realmente adequadas para o presente estudo.

Como destacado por Kaza (2013)<sup>41</sup>, distintas métricas da paisagem podem ser diretamente utilizadas para caracterizar áreas urbanas. A área urbana total é a soma das células classificadas como 'urbanas'. O número de manchas é um indicativo de contiguidade da urbanização: uma grande área urbana total reflete um alto nível de urbanização, enquanto um baixo número de manchas pode sugerir contiguidade e compacidade no padrão urbano. De maneira semelhante, uma alta área média de manchas indica grandes subdivisões ou bairros, enquanto valores baixos indicam desenvolvimentos menores e dispersos. O índice de forma médio é a média dos índices de forma das manchas em uma região, com valores baixos indicando a compacidade dos desenvolvimentos individuais.

Enquanto Kaza (2013) utiliza diretamente as métricas de paisagem para interpretar as configurações de forma urbana nos Estados Unidos, o estudo de Huang, Lu e Sellers (2007) emprega as métricas da paisagem como insumos para calcular índices quantitativos que retratam características físicas do mosaico paisagístico. São sete métricas calculadas que representam cinco dimensões da forma urbana, a saber: compacidade, centralidade, complexidade, porosidade e densidade. A Figura 2-2 ilustra esquematicamente algumas dessas dimensões.

**Figura 2-2:** Ilustração esquemática de métricas espaciais selecionadas



Fonte: Huang, Lu e Sellers., 2007

<sup>41</sup> O Quadro 2.B-1 no apêndice resume as métricas apontadas por Kaza (2013) para caracterizar as mudanças da paisagem urbana.



Essas métricas de paisagem também têm sido usadas para analisar a morfologia urbana, como empregado por Herold *et al.* (2002), que usaram tais métricas para identificar padrões de crescimento urbano, por Xu *et al.* (2007) que caracterizaram fases de crescimento urbano. Esses estudos consideram várias categorias de uso do solo para analisar o crescimento urbano, ao invés de uma única classe. Para melhor compreender as métricas a serem utilizadas neste trabalho, faz-se necessário explorar as bases de dados disponíveis e as possibilidades que elas trazem.

### 2.3.2. Dados de Sensoriamento Remoto e Bases Disponíveis

No reconhecimento da forma espacial urbana, um passo essencial é obtenção de dados da estrutura espacial das áreas urbanas construídas. As imagens de satélite são uma fonte relevante para o mapeamento construído, já que tecnologia de sensoriamento remoto fornece uma visão integrada e abrangente das áreas urbanas. Outra vantagem do uso de dados de sensoriamento remoto para estudos urbanos é a disponibilidade de arquivos de diversos períodos no tempo que permitem, por exemplo, comparar as áreas construídas ao longo do tempo. Nesse contexto, existem diversas formas de definir o que é "urbano" e o que constitui uma "área urbana" em diferentes países (Carter, 1981).

No Reino Unido, espaços abertos completamente cercados por outros tipos de uso do solo urbano (como residencial, industrial e comercial) são considerados parte de uma "área urbana" (Carter, 1981). Na China, terras de viveiro de propriedade coletiva podem ser classificadas como terras agrícolas, mesmo quando cercadas por áreas urbanas (Li, 1991). Similarmente, decidir se um lago ou águas costeiras dentro ou ao lado de uma área urbana devem ser classificados como "urbanos" pode ser subjetivo. Para Huang, Lu e Sellers. (2007), a definição utilizada para classificar 77 áreas urbanas ao redor do globo limitou a área urbana à região construída ou urbanizada. Campos verdes e corpos d'água não diretamente relacionados a atividades de desenvolvimento humano não foram incluídos como parte dessa "área urbana".

No Brasil, há pelo menos duas fontes de dados que identificam a área construída a partir das imagens de satélites e disponibilizam as informações com abrangência nacional: IBGE e Mapbiomas (ver comparativo na Tabela 2.B-3 do apêndice). O IBGE identifica as áreas urbanizadas do Brasil no projeto Áreas Urbanizadas do Brasil, do IBGE, que tem três publicações disponíveis: 2005 e 2015<sup>42</sup> e 2019). A publicação Áreas Urbanizadas do Brasil, do

---

<sup>42</sup> Áreas Urbanizadas do Brasil 2015 foi publicado em 2017 e os arquivos vetoriais correspondentes aos perímetros das concentrações urbanas com população entre 100 mil e 300 mil habitantes e acima de 300 mil habitantes foram disponibilizados para consulta pelo IBGE em 2018.

IBGE, disponibiliza uma representação espacial, obtida a partir da interpretação de imagens de satélite, do fenômeno urbano, com o objetivo de retratar e mensurar, por meio do mapeamento, a forma, a distribuição e a expansão da urbanização. Nos dados referentes a 2019, divulgados em 2022, as imagens são provenientes do Satélite Sentinel-2/MSI, com resolução espacial de 10 metros como insumo-base, para o mesmo ano, em todo o Brasil, com a inclusão das áreas de loteamentos vazios. Já na pesquisa anterior, o mapeamento das manchas urbanas foi obtido com o emprego de imagens de satélite *RapidEye* com resolução espacial de 5 metros. A acurácia no posicionamento do material adquirido permite a realização de mapeamentos cartográficos na escala de 1:50 000 ou menores. A identificação das áreas urbanizadas pelo IBGE é realizada a partir dos aspectos morfológicos das imagens de satélite, além da proximidade entre as residências e edificações e dos padrões de arruamento, gerando uma camada vetorial que delimita as áreas construídas das cidades brasileiras.

Já o projeto MapBiomas produz, dentre outras informações, o mapeamento da Área Urbanizada para todos os municípios brasileiros, sendo a divulgação utilizada neste estudo referente à Coleção 8. O mapeamento geral do Mapbiomas utiliza um método de classificação supervisionada de aprendizado de máquina aplicado às imagens *Landsat*, resultando em mapas anuais de cobertura e uso da terra desde 1985. As imagens do *Landsat* têm o potencial de fornecer tal registro histórico, uma vez que o *Landsat* vem adquirindo imagens desde o início dos anos 1980. Apesar da resolução espacial menos acurada (30 m), a cobertura abrangente, as observações históricas, as atualizações anuais e o livre acesso são vantagens importante para o uso de imagens gerados pelo MapBiomas.

Os mapas anuais de cobertura e uso da terra do Mapbiomas são divulgados em formato *GeoTiff* (*RasterLayer*) e utilizam o sistema de referência geodésico WGS84. As informações estão organizadas em quatro níveis de granularidade. O primeiro nível, mais agregado, identifica 6 tipos principais de uso: Floresta, Formação Natural não Florestal, Agropecuária, Área não Vegetada, Corpo D'água, Não observado. Já o segundo nível é composto por 21 subdivisões e identifica informações como o tipo de floresta (formação savânica, mangue, etc.), o tipo de formação não florestal (formação campestre, afloramento rochoso, etc.), o tipo de agropecuária (pastagem, agricultura, etc.), o tipo de área não vegetada (área urbanizada, mineração, etc.) e o tipo de corpo d'água (rio, lago e oceano ou aquicultura). O Quadro 2.B-2 detalha todos os níveis de classificação do MapBiomas na coleção 8 para o Brasil, bem como as ID's de identificação de cada tipo de pixel e as cores de legenda oficiais (utilizadas também

neste trabalho para identificar cada pixel). A classificação de interesse para este trabalho é a área urbanizada, pertencente à área não vegetada, identificada pela ID número 24.

As áreas classificadas como urbanizadas pelo MapBiomas são “áreas com predominância de superfícies não vegetadas, incluindo ruas, estradas, edifícios, materiais urbanos espectralmente distintos de áreas não urbanizadas e concentração populacional significativa” (ATBD Collection 6, pág. 3, MapBiomas). Uma vez que as áreas urbanizadas do MapBiomas são aquelas áreas com significativa densidade de edificações e vias, incluindo áreas livres de construções e infraestrutura, incluem tanto as vias quanto alguns espaços abertos, particularmente aqueles com áreas relativamente pequenas<sup>43</sup>, como área urbanizada. Por outro lado, áreas pouco densas isoladas não são computadas como urbanas nesta estatística. Conforme discutido no Relatório ATBD MapBiomas Col. 8, a comparação dos dados do Mapbiomas com os dados de 2019 do IBGE aponta para uma subestimação da área urbana na Coleção 8.0 do MapBiomas. O método de interpretação e a maior resolução dos dados do IBGE melhoram o mapeamento de áreas de baixa densidade, que não são completamente mapeadas pelo MapBiomas.

### 2.3.3. Escolhas metodológicas e tratamentos

#### 2.3.3.1. Bases de dados

O advento do projeto MapBiomas, cuja publicação é relativamente recente e atualmente encontra-se consolidada em termos de metodologia e consistência das informações, apresenta-se como uma oportunidade de desenvolvimento de indicadores relacionados à configuração espacial das áreas urbanas. Tendo em vista que a base de dados do Mapbiomas disponibiliza informações para todos os anos desde 1985 e que as informações são atualizadas anualmente, esta pesquisa optou por utilizá-las como base para o cálculo das métricas urbanas. Tal escolha permite a construção de um banco de dados abrangente, com longa série histórica, o que amplia as possibilidades de uso das informações, a despeito de alguma perda de acurácia. Considerando a discussão acima, que evidencia um *tradeoff* entre abrangência dos dados (especialmente com relação à disponibilidade temporal e tempestiva das informações) e acurácia (resolução espacial), é importante observar que os resultados aqui apresentados serão relacionados a áreas urbanas mais densas e que tentativas de medir o espaço aberto dentro da área urbana ou

---

<sup>43</sup> Como exemplo, pode-se citar que espaços abertos dentro da mancha urbana com menos de 1000 metros quadrados são reclassificados, sendo incorporados à mancha urbana.

crescimento fragmentado do tipo “em saltos” (ou *leapfrog*) não são adequadas, pois podem ser viesadas (em geral, subestimadas).

Com relação à seleção das áreas de estudo, a disponibilidade dos dados primários do Mapbiomas apresenta recorte por município brasileiro. Para a avaliação da composição de uma mancha urbanizada, porém, julga-se necessário adequar este ponto de vista, uma vez que muitos municípios brasileiros, embora administrativamente distintos, possuem forte relação espacial (contiguidade), social e/ou econômica. Para lidar com tal dependência entre municípios, esta pesquisa utiliza o conceito de “arranjos populacionais”<sup>44</sup>: localidades compostas por mais de um município com integração significativa<sup>45</sup>. Mais especificamente, um arranjo populacional é o agrupamento de dois ou mais municípios onde há uma forte integração populacional devido aos movimentos pendulares para trabalho ou estudo, ou devido à contiguidade entre as manchas urbanizadas principais. Como há também grandes municípios que não fazem parte de nenhum arranjo populacional, o IBGE introduz um outro conceito que são as concentrações urbanas. Segundo o instituto, as concentrações urbanas compreendem os arranjos populacionais ou os municípios isolados com mais de 100 mil habitantes e podem ser classificadas em concentrações urbanas médias (100 a 300 mil habitantes) e grandes (mais de 300 mil habitantes)<sup>46</sup>.

As concentrações urbanas parecem ser, portanto, uma referência adequada<sup>47</sup> para a definição das aglomerações (manchas/áreas) urbanas, pois constituem agrupamentos de áreas urbanas com grande integração entre si, constituindo, na maioria das vezes, um único mercado de trabalho (Angel *et al*, 2016). Utilizam-se, por conseguinte, os limites definidos pelo contorno dos municípios que compõem cada concentração urbana como áreas de estudo. Além de agregar municípios com alta interação populacional e econômica, outras vantagens de se usar a delimitação das concentrações urbanas como unidade de análise são que seus limites são

---

<sup>44</sup> Do estudo “Arranjos Populacionais e Concentrações Urbanas do Brasil” (ARRANJOS..., 2016) do IBGE ([https://www.ibge.gov.br/apps/arranjos\\_populacionais/2015/#/home](https://www.ibge.gov.br/apps/arranjos_populacionais/2015/#/home))

<sup>45</sup> IBGE (2020)

<sup>46</sup> Em suma, basicamente três conjuntos compõem as unidades territoriais: os Arranjos Populacionais, os Municípios Isolados (demais Municípios) e as Concentrações Urbanas. Abaixo, as definições do IBGE para tais unidades:

Arranjos Populacionais: unidades territoriais compostas por mais de um município, que apresentam integração significativa em razão da contiguidade das áreas urbanizadas ou da presença de deslocamentos frequentes dos habitantes para trabalhar ou estudar.

Municípios Isolados: municípios que não participam de Arranjo Populacional.

Concentrações Urbanas: arranjos populacionais ou municípios isolados que tenham mais de 100 mil habitantes.

<sup>47</sup> Desdobramento posterior deste estudo seria a obtenção das métricas para cidades com menos de 100 mil habitantes.

estáveis, facilitando a comparabilidade dos resultados ao longo do tempo, e muitos dados econômicos estão disponíveis nesse nível.

#### 2.3.3.2. *Indicadores selecionados*

Com base na literatura especializada acima apresentada e na disponibilidade de dados, este artigo identifica como indicadores relevantes para caracterizar a forma espacial urbana do ponto de vista das características físicas do mosaico da paisagem a extensão, a complexidade dos fragmentos, a complexidade dos limites urbanos, a centralidade e a compacidade. Optou-se por utilizar como referência de análise os indicadores definidos por Huang, Lu e Sellers. (2007), o qual utiliza como insumos as métricas de paisagem originais de McGarigal e Marks (1995) para gerar índices que sintetizam características das formas físicas com um significado claro a respeito de cada valor calculado e possibilidade de comparação dos índices entre diferentes áreas urbanas. Assim, ao invés de se utilizar diretamente o número de fragmentos de uma área urbana, ou a área média desses fragmentos, escolhem-se índices que comparam as características observadas a formas geométricas simplificadas, como círculo e quadrado. Optou-se por índices que condensam algumas características em uma métrica, que são representativos dos aspectos físicos das cidades e estão presentes em artigo contemporâneos que tratam do tema. A Tabela 2-1 apresenta uma descrição dos indicadores selecionados para caracterizar as dimensões da configuração urbana.

**Tabela 2-1:** Dimensões da configuração urbana – indicadores selecionados

| Dimensão                         | Indicador                                                            | Fórmula                                                                                                                          | Definição                                                                                                                                                                                                                    | Interpretação                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                              |
|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Extensão                         | Área total da área urbanizada na concentração urbana (CA) - em k00m2 | $CA = \sum_{P_i \in C} a_i$                                                                                                      | em que $a_i$ é a área do fragmento (patch) $P_i$ e $C$ é a concentração urbana                                                                                                                                               | A área urbana total é essencialmente a soma das células classificadas como 'urbanas'.                                                                                                                                                                                | Quanto maior, mais alto o nível de urbanização                                                                                               |
| Complexidade dos fragmentos      | Índice de forma média ponderada por área (AWMSI)                     | $AWMSI = \frac{\sum_{i=1}^N p_i / 4 \sqrt{s_i} \times s_i / \sum_{i=1}^N s_i}{N}$                                                | $s_i$ e $p_i$ são a área e o perímetro do patch $i$ e $N$ é o número total de patches                                                                                                                                        | AWMSI indica a regularidade das manchas. É menor para feições circulares ou células quadradas e aumenta com a irregularidade.                                                                                                                                        | Quanto maior, maior complexidade dos fragmentos                                                                                              |
| Complexidade dos limites urbanos | Dimensão fractal média ponderada por área (AWMPFD)                   | $AWMPFD = \frac{\sum_{i=1}^N 2 \ln 0.25 \cdot i / \ln s_i \times s_i / \sum_{i=1}^N s_i}{N}$                                     | $s_i$ e $p_i$ são a área e o perímetro do patch $i$ e $N$ é o número total de patches                                                                                                                                        | AWMPFD indica a irregularidade do limite urbano. É menor para formas simples e aumenta conforme as formas ficam mais complexas.                                                                                                                                      | Quanto maior, maior irregularidade dos limites urbanos                                                                                       |
| Centralidade                     | Centralidade do maior fragmento (CE)                                 | $CE = \frac{R}{\sum_{i=1}^{N-1} D_i / N - 1} \times 100$<br><br>$= \frac{\sqrt{S/\pi}}{\sum_{i=1}^{N-1} D_i / N - 1} \times 100$ | em que $S$ é a área de resumo de todos os patches (área urbanizada), $R$ é o raio de um círculo com área de $S$ , $D_i$ é a distância do centroide do patch $i$ ao centroide do maior patch, $N$ é o número total de patches | O índice de centralidade indica a razão entre o raio de um círculo de área igual à área urbana em questão e a distância média dos fragmentos urbanos em relação ao maior fragmento (patch). Mensura a forma geral da cidade, ou seja, se ela é alongada ou circular. | Quanto mais próximo de zero, mais alongada é a forma geral da cidade. Quanto mais próximo da forma circular, mais o índice aproxima-se de 1. |
| Compacidade                      | Índice de compacidade (CI)                                           | $CI = \frac{\sum_i P_i / p_i}{N} \times 100$<br><br>$= \frac{\sum_i 2\pi \sqrt{s_i/\pi} / p_i}{N} \times 100$                    | $s_i$ e $p_i$ são a área e o perímetro do patch $i$ , $P_i$ é o perímetro de um círculo com a área de $s_i$ e $N$ é o número total de patches                                                                                | O IC compara o perímetro da área urbana com de um círculo de igual área. É maior para paisagens mais regulares (perímetro mais próximo de um círculo de igual área) e com baixo número de manchas.                                                                   | Quanto maior, mais compacta a mancha urbana                                                                                                  |

Fonte: Elaboração própria baseada em Huang; Lu; Sellers, 2007; Schwarz, 2010.

A extensão absoluta da área urbanizada (CA) indica o tamanho da área urbana estimada dentro da área de estudo. É apresentada neste artigo em quilômetros quadrados e é

essencialmente a soma das dimensões das células classificadas como 'urbanas'. Quanto maior a extensão urbana, mais alto o nível de urbanização de determinada concentração (Kaza, 2013).

Outra dimensão calculada é a complexidade dos fragmentos. Tal como proposto por Huang, Lu e Sellers. (2007), a complexidade dos fragmentos denota a irregularidade da forma das manchas e é medida pelo índice de forma média ponderada pela área (AWMSI). Quanto maior o AWMSI, maior complexidade dos diversos fragmentos que compõem a área urbana, os quais se distanciam de formas circulares ou quadradas. Altos valores podem indicar formas irregulares e fragmentação excessiva, promovendo maiores distâncias entre diferentes usos do solo, dificultando a conectividade e o acesso a modos de transporte sustentável e aumentando a dependência do carro (Wu *et al.*, 2002). Entretanto, também podem estar associados à presença de áreas verdes planejadas, que fragmentam o espaço urbano de forma controlada<sup>48</sup>, melhorando a qualidade ambiental e incentivando atividades locais<sup>49</sup> e a “caminhabilidade” (Gill *et al.*, 2007; Alberti, 2005). É preciso atenção também ao fato de que a fragmentação pode refletir ocupações informais, como favelas.

Já a complexidade dos limites urbanos descreve principalmente a irregularidade da fronteira urbana. Ela deriva da dimensão fractal, uma medida "adequada para resumir os padrões de uso do solo irregularmente recortados que caracterizam as cidades do mundo real" (Longley; Mesev, 2000). Estima-se então o indicador denominado dimensão fractal média ponderada pela área das manchas (AWMPFD), o qual se aproxima de um para formas com perímetros simples (círculos ou quadrados) e se aproxima de dois quando as formas são mais complexas (Huang; Lu; Sellers, 2007). A complexidade dos limites urbanos frequentemente está associada à baixa densidade, incentivando o uso de veículos motorizados devido à falta de infraestrutura de transporte público e à maior dependência do automóvel (Liu; Fan; Xue, 2024); Su *et al.*, 2012).

O índice de centralidade (CE), por sua vez, baseia-se na metodologia de Huang, Lu e Sellers. (2007)<sup>50</sup>, para o qual a centralidade é focada nas características físicas da área urbana e mede a distância média das partes dispersas ao centro da cidade, o qual é definido como o centroide da maior mancha<sup>51</sup>. Assim o indicador de centralidade aqui apresentado indica a razão

<sup>48</sup> Por exemplo, com infraestrutura de transporte sustentável, como ciclovias, pontes e passarelas.

<sup>49</sup> Áreas verdes próximas a residências e locais de trabalho incentivam a redução das emissões indiretas de GEE, promovendo atividades recreativas locais e diminuindo a necessidade de transporte para lazer e recreação em áreas mais afastadas (Haaland e van den Bosch, 2015).

<sup>50</sup> Concepção diferente de Galster *et al.* (2001), para o qual a centralidade mede o grau em que o desenvolvimento urbano está próximo do distrito comercial central (CBD).

<sup>51</sup> Nesta pesquisa, porém, inverte-se o indicador original para tornar direta a interpretação.

entre o raio de um círculo de área igual à área urbana em questão e a distância média dos fragmentos urbanos em relação ao maior fragmento (*patch*). Ele mensura a forma geral da cidade, ou seja, se ela é alongada ou circular. Quanto mais próximo de zero, mais alongada é a forma geral da cidade. Quanto mais próximo da forma circular, maior o indicador. O impacto do grau de centralidade sobre as emissões de GEE depende das condições locais. Em cidades bem planejadas, com redes de transporte público integradas e políticas de incentivo à mobilidade sustentável, o efeito tende a ser negativo (Lee; Lee, 2014; Seto *et al.*, 2014; Newman; Kenworthy, 1999). Por outro lado, a centralização pode estar associada a maiores emissões de GEE quando há alta concentração de atividades econômicas intensivas em energia, como indústrias, ou quando o transporte público não é suficientemente eficiente para atender à demanda, forçando o uso de veículos motorizados individuais (Bai *et al.*, 2012; Marshall, 2008). Ademais, a superlotação de áreas centrais pode levar a congestionamentos e ao aumento das emissões devido à maior frequência de veículos em trânsito (Hickman *et al.*, 2017).

Por fim, o índice de compacidade (IC), adaptado da metodologia de Li e Yeh (2004)<sup>52</sup>, mede não apenas a forma individual das manchas, mas também a fragmentação da paisagem urbana como um todo. O IC é maior para paisagens mais regulares (perímetro mais próximo de um círculo de igual área) e com baixo número de manchas (Huang; Lu; Sellers; 2007). Em geral, áreas urbanas mais compactas evitam a expansão desordenada e facilitam a implementação de transporte público e de modos ativos de mobilidade, como caminhadas e ciclismo, reduzindo as emissões associadas ao transporte. Assim, a compactação urbana permite uma infraestrutura de serviços mais eficiente, diminuindo o consumo energético per capita e, consequentemente, as emissões (Alberti, 2005).

Vale notar que, dentre os índices definidos por Huang, Lu e Sellers (2007), dois não foram incluídos na presente análise: (i) porosidade, devido a limitações de resolução espacial na base de dados utilizada como insumo; e (ii) densidade, que possui metodologia distinta por juntar dados espaciais com demográficos. A densidade foi o foco da análise do primeiro artigo desta tese e será explorada na seção de resultados a título de comparação com as métricas espaciais e outros indicadores socioeconômicos.

---

<sup>52</sup> A metodologia original de cálculo considera a divisão pelo quadrado do número de fragmentos, enquanto a metodologia adaptada não utiliza a segunda potência. Isso se deve a distorções observadas empiricamente no cálculo do índice de compacidade para as regiões brasileiras, onde o peso de N é considerado excessivo por distorcer os resultados finais, fazendo com que a compacidade fique inversamente proporcional a N e não reflitam grandes influências da regularidade da paisagem, medida pela relação entre área e perímetro urbanos.



### 2.3.3.3. *Tratamentos realizados*

Todos os procedimentos estatísticos e de geoprocessamento foram realizados utilizando o pacote de software R-4.2.1 e Rstudio versão 19.1.3, como já explicitado. Cada paisagem neste estudo está ligada a uma concentração urbana, que pode ser um município isolado ou a união dos limites administrativos dos municípios que compõem a concentração (união esta identificada pelo IBGE como um arranjo populacional), ambos com mais de 100 mil habitantes. As informações georreferenciadas das concentrações urbanas foram obtidas por meio do pacote *geobr*, disponibilizado pelo IPEA a partir de informações do IBGE. A base de dados vetoriais (*shapefiles*) é referente a 2015 e utiliza o sistema de referência geodésico "SIRGAS2000", CRS(4674)<sup>53</sup>. Os dados georreferenciados do IBGE (vetores) relativos às concentrações urbanas foram utilizados para selecionar o mapeamento de uso e ocupação do solo do MapBiomas (*raster*) para as áreas de estudo selecionadas.

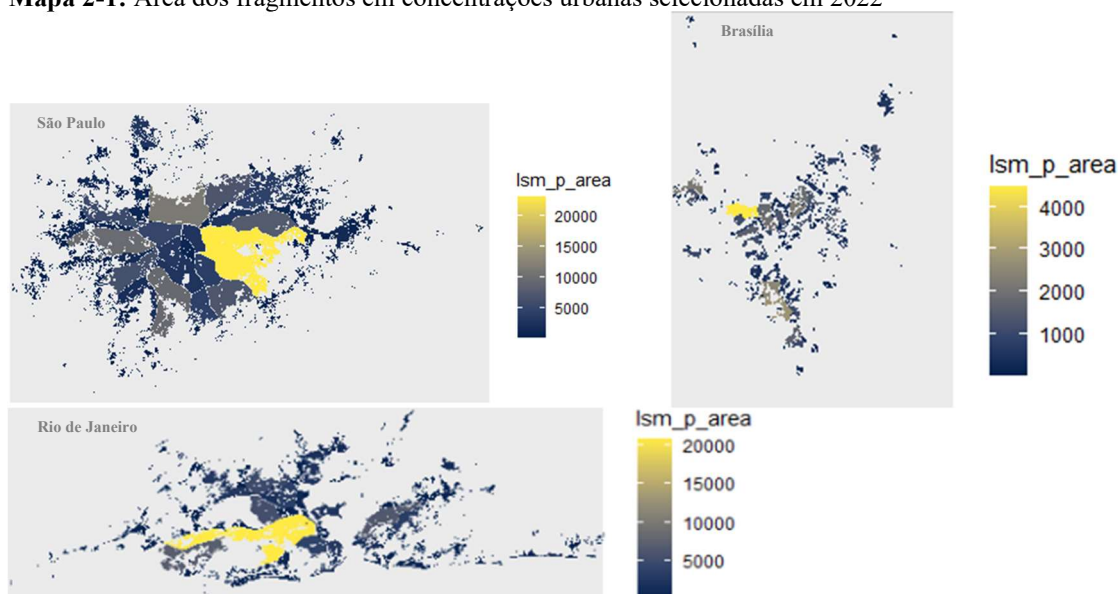
Embora as informações do IBGE e do MapBiomas utilizem a mesma unidade de medida (ângulos – sistema de coordenadas geográficas), possuem diferentes *data*, já que os mapas do IBGE estão baseados no SIRGAS2000 e os mapas do MapBiomas em WGS84. Para compatibilizar as informações, foi necessário transformar o CRS dos vetores do IBGE para WGS84. Isto possibilitou o corte do *raster* e seu mascaramento com uso dos objetos vetoriais de cada área de concentração de interesse. Os mapas resultantes formam a base de entrada para a análise da área urbana a ser realizada neste estudo. Alguns tratamentos adicionais foram necessários antes de se efetuarem os cálculos das métricas de paisagem e estão descritos no apêndice 2.B.

Os Mapas 2-1 trazem ilustrações dos fragmentos (*patches*) identificados com o uso da metodologia do *landscapemetrics* em três concentrações urbanas selecionadas (São Paulo/SP, Rio de Janeiro/RJ e Brasília/DF) em 2022. A escala de cores classifica os fragmentos identificados por tamanho, medido pela área (em hectares). Os maiores fragmentos estão identificados em amarelo. A identificação dos fragmentos por concentração urbana é a base para o cálculo das métricas finais estimadas, as quais serão apresentadas na próxima seção.

---

<sup>53</sup> CRS = Coordinate Reference System (Sistema de Referência de Coordenadas)

**Mapa 2-1:** Área dos fragmentos em concentrações urbanas selecionadas em 2022



Fonte: Elaboração própria

## 2.4. Resultados

### 2.4.1. Os indicadores espaciais nas concentrações urbanas brasileiras

As estatísticas descritivas apresentadas na Tabela 2-2 apresentam a média e o desvio-padrão das 187 concentrações urbanas brasileiras para cada métrica urbana estimada e para cada ano considerado (1985, 1991, 2000, 2010, 2015 e 2022). O indicador de extensão urbana (CA) mostra que as concentrações urbanas apresentaram área urbana média de 36,69 quilômetros quadrados (km²) em 1985 e 103,60 km² em 2022. O elevado desvio-padrão reforça as diferentes magnitudes das manchas urbanas no País. Uma leitura mais detalhada por concentração<sup>54</sup> indica que, em 2022, a concentração com maior extensão de área urbanizada foi São Paulo (1809,28 km²) e a menor Cametá/PA (7,79 km²).

<sup>54</sup> Base de dados disponível sob demanda.

**Tabela 2-2:** Estatísticas descritivas por métrica espacial e ano

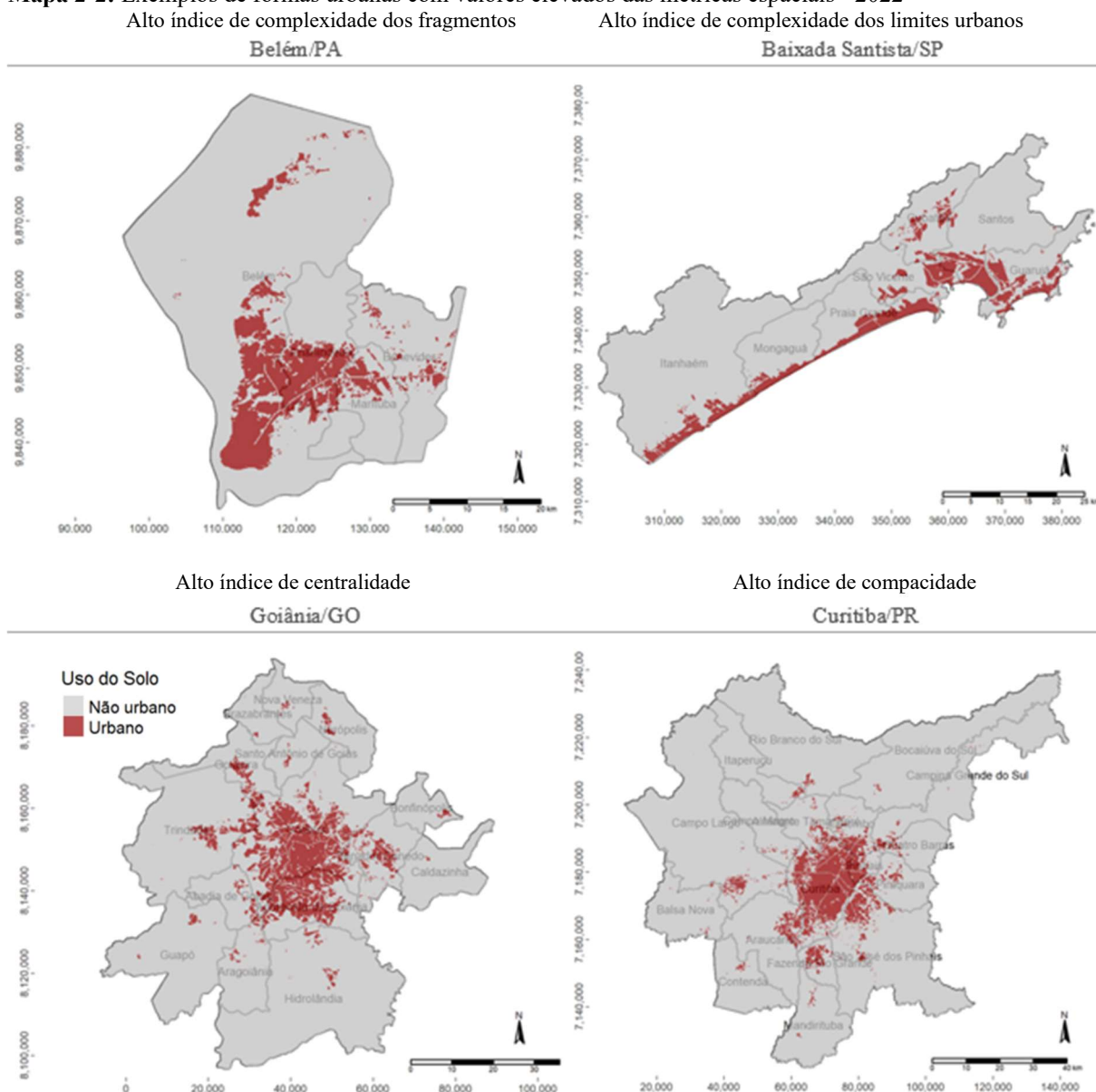
| Tipo                  | Métrica                                   | 1985,<br>N = 186 <sup>1,2</sup> | 1991,<br>N = 187 <sup>1</sup> | 2000,<br>N = 187 <sup>1</sup> | 2010,<br>N = 187 <sup>1</sup> | 2015,<br>N = 187 <sup>1</sup> | 2022,<br>N = 187 <sup>1</sup> |
|-----------------------|-------------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Concentrações urbanas | Extensão Urbana (CA)                      | 36,668<br>(95,086)              | 48,721<br>(111,773)           | 73,741<br>(157,714)           | 88,284<br>(176,196)           | 96,686<br>(185,812)           | 103,599<br>(192,326)          |
|                       | Número de fragmentos                      | 108,640<br>(168,512)            | 127,674<br>(191,957)          | 153,856<br>(225,071)          | 162,594<br>(229,661)          | 168,219<br>(234,672)          | 168,941<br>(236,193)          |
|                       | Complexidade dos fragmentos (AWMSI)       | 0,060<br>(0,052)                | 0,051<br>(0,040)              | 0,045<br>(0,037)              | 0,043<br>(0,037)              | 0,042<br>(0,036)              | 0,044<br>(0,039)              |
|                       | Complexidade dos limites urbanos (AWMPFD) | 0,026<br>(0,025)                | 0,021<br>(0,017)              | 0,017<br>(0,014)              | 0,016<br>(0,014)              | 0,016<br>(0,014)              | 0,016<br>(0,014)              |
|                       | Centralidade (CE)                         | 0,358<br>(0,137)                | 0,372<br>(0,139)              | 0,400<br>(0,140)              | 0,417<br>(0,142)              | 0,430<br>(0,141)              | 0,438<br>(0,141)              |
|                       | Compacidade (CI)                          | 0,617<br>(0,022)                | 0,617<br>(0,021)              | 0,609<br>(0,018)              | 0,606<br>(0,020)              | 0,601<br>(0,018)              | 0,596<br>(0,019)              |

<sup>1</sup>Média (Desvio-Padrão); <sup>2</sup>Não foi capturada área urbanizada para a concentração urbana de Bragança-PA (código IBGE 1501709) em 1985.

Fonte: Elaboração própria

Com relação à complexidade das áreas urbanas, há dois indicadores estimados. A complexidade média dos fragmentos (AWMSI) foi de 0,060 em 1985 e 0,044 em 2022 nas áreas urbanizadas das concentrações. A concentração com maior complexidade nos fragmentos em 2022 foi Internacional de Corumbá/Brasil (MS) e a com menor índice São Paulo/SP; Belém/PA, ilustrada na figura abaixo, é um exemplo de grande concentração cuja área urbanizada apresenta elevada complexidade dos fragmentos. Além da complexidade dos fragmentos, é possível observar também a complexidade dos limites urbanos (AWMPFD). Neste caso, a média das concentrações foi de 0,026 em 1985 e passou a 0,016 em 2022. Abaetetuba (PA) ocupa o primeiro lugar no ranking de complexidade dos limites urbanos e São Paulo/SP o último. Um exemplo tipicamente complexo é Baixada Santista/SP (Mapa 2-2).

No que se refere ao grau de centralidade das concentrações (CE), a média do índice foi de 0,358 em 1985 e de 0,438 em 2022, sendo que quanto menor o índice, mais alongada é a área urbanizada. A mais central das concentrações urbanas em 2022 foi Manaus (AM), enquanto a menos central foi Angra dos Reis (RJ). Por fim, o indicador de compacidade (CI) indica que, quanto maior a presença de manchas regulares (perímetro mais próximo do esperado para um círculo de igual área urbana) e menor o número de fragmentos, maior a compacidade. O indicador apresenta média de 0,617 em 1985 e de 0,596 em 2022. A concentração mais compacta em 2022 foi Itajubá/MG e a menos compacta Araguaína/TO. É importante notar que CI contrapõe, de um lado, uma tendência histórica de áreas urbanas cada vez mais concêntricas e, de outro lado, um aumento no número de fragmentos. As ilustrações abaixo destacam Goiânia/GO com elevado índice de centralidade e Curitiba/PR altamente compacta (Mapa 2-2).

**Mapa 2-2:** Exemplos de formas urbanas com valores elevados das métricas espaciais - 2022

Notas:

Belém/PA: área urbanizada com elevada complexidade dos fragmentos;

Baixada Santista/SP: área urbanizada com elevada complexidade dos limites urbanos;

Goiânia/GO: área urbanizada com elevado índice de centralidade;

Curitiba/PR: área urbanizada com elevado índice de compactidade.

Fonte: Elaboração própria

#### 2.4.2. Relações entre os indicadores

A análise de correlação mostra importantes relações entre as métricas espaciais (Tabela 2-3). Há uma forte e positiva correlação entre a extensão urbana (CA) e o número de fragmentos ( $n_{frag}$ ). Por outro lado, CA guarda correlação negativa com os índices de complexidade, o que indica que áreas urbanizadas mais extensas estão relacionadas com índices menores de complexidade dos fragmentos e dos limites urbanos. Além das concentrações urbanas maiores estarem correlacionadas com complexidades de fragmentos menores, elas são correlacionadas

positivamente com paisagens mais centralizadas/menos alongadas (índice CE). Ou seja, observa-se que áreas urbanas mais extensas tendem a ter manchas urbanas com maior número de fragmentos, menos complexidade nos fragmentos e nos limites urbanos e mais centralizadas. Embora AWMPFD e AWMSI representem diferentes dimensões da complexidade da paisagem, há uma forte correlação positiva entre eles. Adicionalmente, percebe-se que áreas mais centralizadas estão correlacionadas com áreas menos complexas. Por fim, concentrações urbanas mais compactas estão negativamente relacionadas a áreas com menos complexidades.

**Tabela 2-3:** Análise da correlação de Pearson entre métricas espaciais (2010<sup>1</sup>)

|                                  | Extensão urbana | Número de fragmentos | Complexidade dos fragmentos | Complexidade dos limites urbanos | Centralidade | Compacidade |
|----------------------------------|-----------------|----------------------|-----------------------------|----------------------------------|--------------|-------------|
| Extensão urbana                  | 1               |                      |                             |                                  |              |             |
| Número de fragmentos             | 0,934***        | 1                    |                             |                                  |              |             |
| Complexidade dos fragmentos      | -0,321***       | -0,456***            | 1                           |                                  |              |             |
| Complexidade dos limites urbanos | -0,347***       | -0,474***            | 0,965***                    | 1                                |              |             |
| Centralidade                     | 0,298***        | 0,235**              | -0,085                      | -0,178*                          | 1            |             |
| Compacidade                      | 0,025           | 0,116                | -0,211**                    | -0,231**                         | 0,103        | 1           |

<sup>1</sup>Ver matriz de correlação para demais anos na Tabela 2.C-1 do apêndice.

\*\* Correlação é significativa ao nível de 0,01 (teste bicaudal).

\*\*\* Correlação é significativa ao nível de 0,001 (teste bicaudal).

Fonte: Elaboração própria

O padrão de correlação entre as variáveis mostra pouca variação ao longo do tempo. Ao observar a correlação entre a extensão urbana (CA) e o número de fragmentos, percebe-se que a estatística se mantém positiva, elevada e altamente significativa entre 1985 e 2022, tendo apresentado tendência de elevação ao longo do período. CA apresenta correlação negativa e significativa com AWMSI e AWMPFD em todo o período, enquanto a correlação positiva de CA com CE também é mantida ao longo dos anos. Por fim, CA e CI não apresentam correlação estatisticamente significativa em nenhum dos anos em estudo (Tabela 2-4).

**Tabela 2-4:** Análise da correlação de Pearson entre a Extensão Urbana (CA) e demais métricas espaciais por ano

|      |                       | Número de<br>Fragmentos<br>(n frag) | Complexidade<br>dos fragmentos<br>(AWMSI) | Complexidade<br>dos limites<br>urbanos<br>(AWMPFD) | Centralidade<br>(CE) | Compacidade<br>(CI) |
|------|-----------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------|---------------------|
| 1985 | Correlação de Pearson | 0,884                               | -0,271                                    | -0,181                                             | 0,290                | -0,024              |
|      | p-valor               | 0,000                               | 0,000                                     | 0,014                                              | 0,000                | 0,747               |
| 1991 | Correlação de Pearson | 0,878                               | -0,316                                    | -0,233                                             | 0,301                | -0,023              |
|      | p-valor               | 0,000                               | 0,000                                     | 0,001                                              | 0,000                | 0,757               |
| 2000 | Correlação de Pearson | 0,919                               | -0,317                                    | -0,188                                             | 0,307                | 0,013               |
|      | p-valor               | 0,000                               | 0,000                                     | 0,010                                              | 0,000                | 0,861               |
| 2010 | Correlação de Pearson | 0,932                               | -0,321                                    | -0,214                                             | 0,302                | -0,017              |
|      | p-valor               | 0,000                               | 0,000                                     | 0,003                                              | 0,000                | 0,818               |
| 2015 | Correlação de Pearson | 0,934                               | -0,321                                    | -0,178                                             | 0,298                | 0,025               |
|      | p-valor               | 0,000                               | 0,000                                     | 0,015                                              | 0,000                | 0,731               |
| 2022 | Correlação de Pearson | 0,934                               | -0,318                                    | -0,178                                             | 0,298                | 0,080               |
|      | p-valor               | 0,000                               | 0,000                                     | 0,015                                              | 0,000                | 0,276               |

Fonte: Elaboração própria

#### 2.4.3. Comparação das métricas espaciais por região geográfica

As estatísticas relacionadas às métricas espaciais não apresentam, em geral, diferenças significativas entre as regiões geográficas brasileiras, conforme análises de variância (ANOVA) apresentadas a seguir. A amostra testada refere-se às informações de 2010 conta com 17 concentrações urbanas no Norte, 37 no Nordeste, 80 no Sudeste, 37 no Sul e 14 no Centro-Oeste (Tabela 2-5).

**Tabela 2-5:** Estatísticas descritivas por métrica espacial e região geográfica - 2010

| Métrica <sup>1</sup>                         | Norte<br>(N=17)    | Nordeste<br>(N=37) | Sudeste<br>(N=80)   | Sul (N=37)          | Centro-<br>Oeste<br>(N=14) |
|----------------------------------------------|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------|----------------------------|
| Extensão Urbana (CA)                         | 69,558<br>(65,839) | 68,652<br>(88,241) | 97,293<br>(237,116) | 75,941<br>(102,771) | 142,004<br>(201,826)       |
| Complexidade dos<br>fragmentos (AWMSI)       | 0,057<br>(0,049)   | 0,045<br>(0,036)   | 0,041<br>(0,034)    | 0,035<br>(0,025)    | 0,052<br>(0,058)           |
| Complexidade dos limites<br>urbanos (AWMPFD) | 0,023<br>(0,022)   | 0,018<br>(0,014)   | 0,015<br>(0,012)    | 0,012<br>(0,009)    | 0,019<br>(0,017)           |
| Centralidade (CE)                            | 0,380<br>(0,208)   | 0,392<br>(0,137)   | 0,417<br>(0,128)    | 0,446<br>(0,123)    | 0,427<br>(0,167)           |
| Compacidade (CI)                             | 0,604<br>(0,024)   | 0,607<br>(0,023)   | 0,604<br>(0,019)    | 0,613<br>(0,014)    | 0,593<br>(0,020)           |

<sup>1</sup>Média (Desvio-Padrão)

Fonte: Elaboração própria

Para verificar a existência de diferenças estatisticamente significantes entre as regiões geográficas, foram realizados os testes estatísticos de análises de variância – ANOVA, em suas

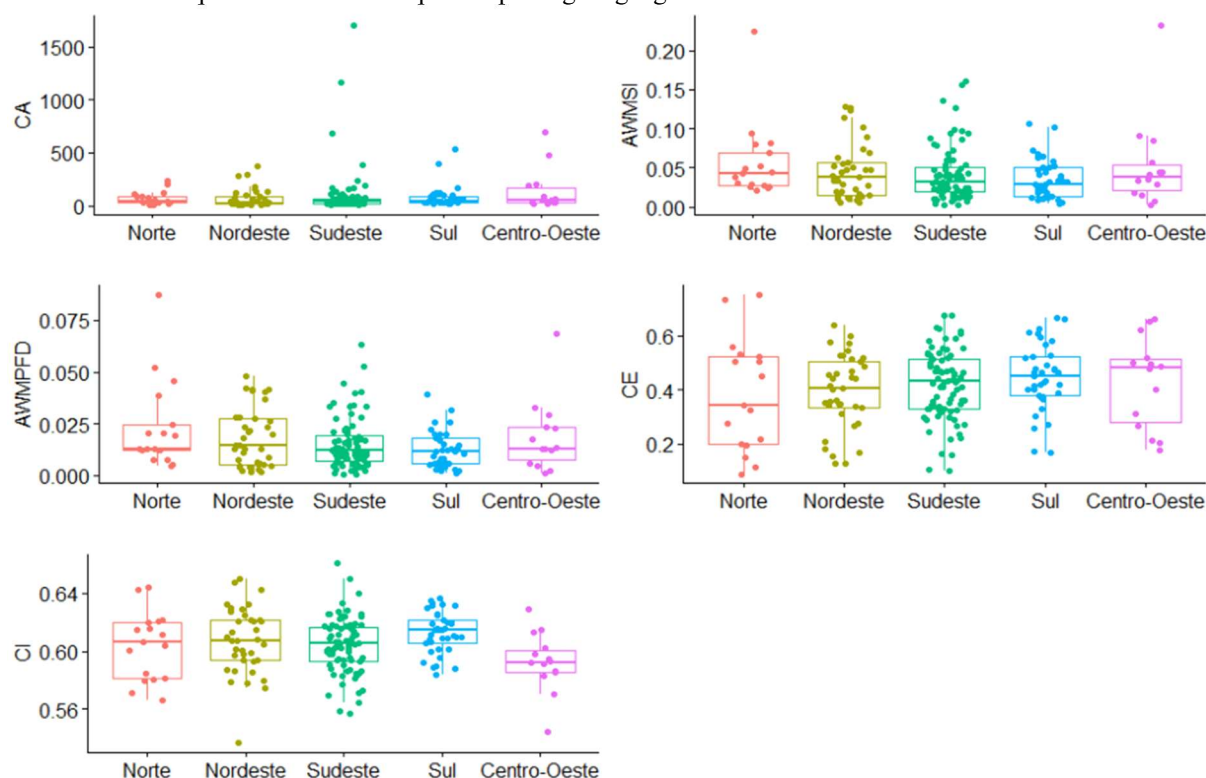
versões paramétricas e não paramétricas<sup>55</sup>. Preliminarmente, a premissa da ANOVA referente à normalidade dos resíduos foi testada através do teste de Shapiro-Wilk<sup>56</sup>, cuja hipótese nula é de que não há diferença entre a distribuição dos dados e a distribuição normal (Tabela 2-6). O p-valor maior que 0,05 para Centralidade (CE) e Compacidade (CI) permite afirmar que há evidência estatística de que as distribuições dos resíduos destas duas métricas não diferem da distribuição normal. Por outro lado, CA, AMWSI e AMPFD não parecem satisfazer a premissa de normalidade dos resíduos da ANOVA. Com relação à homogeneidade dos dados, foi aplicado o Teste de Levene<sup>57</sup>. Sendo a hipótese nula que não há diferença entre as variâncias dos grupos, o p-valor maior do que 0,05 observado nas métricas CA, AWMSI, AWMPFD e CI indica que há evidência estatística de que as variâncias são iguais entre as regiões geográficas e, portanto, os dados são homogêneos entre estes grupos. Ao contrário, podemos afirmar que as variâncias são estatisticamente diferentes entre as regiões para a métrica CE. Os gráficos Boxplot por região ilustram a distribuição de cada métrica, bem como aponta para a existência de importantes *outliers*, especialmente nas estatísticas CA, AWMSI e AWMPFD (Gráfico 2-1).

---

<sup>55</sup> Por um lado, os testes paramétricos tendem a ser mais eficazes que os testes não paramétricos e aumentam a probabilidade de identificar diferenças significativas entre as condições. Por outro lado, os testes não paramétricos têm a vantagem de não exigir suposições sobre a forma das distribuições populacionais. Eles são úteis quando os dados são fortemente assimétricos ou não seguem uma distribuição normal. Além disso, esses testes podem ser usados em situações onde há outliers nos dados ou o tamanho da amostra é reduzido (Toprak, 2019, p. 180).

<sup>56</sup> Para verificar se uma variável segue uma distribuição Normal, os dois testes estatísticos mais comuns são o teste de Kolmogorov-Smirnov e o teste de Shapiro-Wilk. Em ambos, a hipótese nula ( $H_0$ ) é que os dados seguem uma distribuição Normal. Estudos comparativos (Saculungan & Balase, 2013) sobre diferentes testes de normalidade mostram que o teste de Shapiro-Wilk possui o maior poder estatístico.

<sup>57</sup> Existem dois testes estatísticos para verificar se uma variável apresenta variâncias homogêneas entre diferentes grupos ou estratos: o teste de Bartlett e o teste de Levene. A hipótese nula ( $H_0$ ) dos dois afirma que as variâncias dos grupos/estratos são iguais. O teste de Bartlett baseia-se na média dos grupos, o que o torna sensível a observações extremas (*outliers*). Por outro lado, o teste de Levene utiliza a mediana dos grupos, tornando-o mais resistente à presença de *outliers*, razão pela qual este foi o teste aplicado no presente trabalho.

**Gráfico 2-1:** Boxplot com métricas espaciais por região geográfica - 2010

Fonte: Elaboração própria

Dos testes apresentados, pode-se concluir que apenas o indicador de Compacidade (CI) não viola as premissas de normalidade e homogeneidade para o teste da ANOVA, indicando uma maior adequação para se aplicar tal teste em sua versão paramétrica. O valor menor que 0,05 observado para o p-valor do teste indica que há uma diferença entre as médias de cada região, uma vez que rejeitamos a hipótese nula de que todas as médias são iguais. Foi então aplicado o teste HSD de *Tukey* para determinar quais médias das regiões diferem entre si. O teste HSD de *Tukey* demonstrou que as diferenças entre CI no Sul (média = 0,613; desvio-padrão = 0,014) e no Centro-Oeste (média = 0,593; desvio-padrão = 0,020) são improváveis de serem causadas por erro de amostragem. Por outro lado, não houve diferenças significativas entre o nível de compacidade nas demais regiões geográficas. Para as demais métricas (CA, AWMSI, AWMPFD e CE), a violação das hipóteses da ANOVA paramétrica sugere a utilização do equivalente teste não paramétrico (Teste *Kruskal-Wallis*). Em todos estes casos, a análise sugere que as diferenças entre as médias não são estatisticamente significantes (Tabela 2-6).



**Tabela 2-6:** Testes de Levene para homogeneidade da variância e de Shapiro-Wilk para normalidade dos resíduos

| Métrica                                   | Df  | Teste de Normalidade Shapiro-Wilk |          | Teste de Levene para Homocedasticidade |         | ANOVA paramétrica - HSD de Tukey |         | ANOVA não-paramétrica - Teste Kruskal-Wallis |    |         |
|-------------------------------------------|-----|-----------------------------------|----------|----------------------------------------|---------|----------------------------------|---------|----------------------------------------------|----|---------|
|                                           |     | W                                 | p-valor  | F                                      | p-valor | F                                | p-valor | $\chi^2$                                     | df | p-valor |
| Extensão Urbana (CA)                      | 180 | 0,428                             | 0,000*** | 0,496                                  | 0,739   | 0,574                            | 0,682   | 6,703                                        | 4  | 0,152   |
| Complexidade dos fragmentos (AWMSI)       | 180 | 0,827                             | 0,000*** | 0,773                                  | 0,544   | 1,320                            | 0,264   | 4,238                                        | 4  | 0,375   |
| Complexidade dos limites urbanos (AWMPFD) | 180 | 0,880                             | 0,000*** | 1,943                                  | 0,105   | 2,253                            | 0,065   | 5,026                                        | 4  | 0,285   |
| Centralidade (CE)                         | 180 | 0,990                             | 0,249    | 3,389                                  | 0,011*  | 0,984                            | 0,418   | 3,157                                        | 4  | 0,532   |
| Compacidade (CI)                          | 180 | 0,991                             | 0,320    | 1,932                                  | 0,107   | 3,048                            | 0,018*  | 12,942                                       | 4  | 0,012*  |

Notas: 0 '\*\*\*' 0,001 '\*\*\*' 0,01 '\*' 0,05 ' ' 0,1 ' ' 1

Fonte: Elaboração própria

#### 2.4.4. Comparação entre tipos de concentração urbana

As estatísticas descritivas apresentadas na Tabela 2-7 apresentam a média e o desvio-padrão das 24 grandes concentrações urbanas brasileiras e 163 concentrações urbanas médias para cada métrica urbana estimada e para cada ano considerado (1985, 1991, 2000, 2010, 2015 e 2022). O indicador de extensão urbana (CA) mostra que as grandes concentrações urbanas apresentaram área urbana média de 164,36 km<sup>2</sup> em 1985 e 424,04 km<sup>2</sup> em 2022. Dentre as grandes concentrações, as três maiores em extensão da área urbanizada são São Paulo/SP (1.809,28 km<sup>2</sup>), Rio de Janeiro/RJ (1.276,55 km<sup>2</sup>) e Brasília/DF (786,84 km<sup>2</sup>), enquanto as três menores são João Pessoa/PB (160,08 km<sup>2</sup>), Maceió/AL (145,93 km<sup>2</sup>) e Aracaju/SE (124,82 km<sup>2</sup>). As médias concentrações, por sua vez, apresentaram extensão da mancha urbanizada média de 17,51 e 56,12 km<sup>2</sup> em 1985 e 2022, respectivamente. Uma leitura mais detalhada por concentração indica que, em 2022, as concentrações médias com maior extensão de área urbanizada foram Porto Alegre/RS (441,25 km<sup>2</sup>), São José dos Campos/SP (190,35 km<sup>2</sup>) e Jundiaí/SP (181,65 km<sup>2</sup>). Dentre as médias, as menores extensões urbanas foram registradas em Itapipoca (CE) (11,48 km<sup>2</sup>), Abaetetuba (PA) (11,07 km<sup>2</sup>) e Cametá (PA) (7,79 km<sup>2</sup>).

Com relação à complexidade das áreas urbanas, as médias concentrações mostram maior complexidade média tanto dos fragmentos (AWMSI) quanto dos limites urbanos (AWMPFD), enquanto o grau de centralidade é maior nas grandes concentrações. Já o grau de compacidade não apresenta diferença entre grandes e médias concentrações, conforme testes estatísticos apresentados mais abaixo.

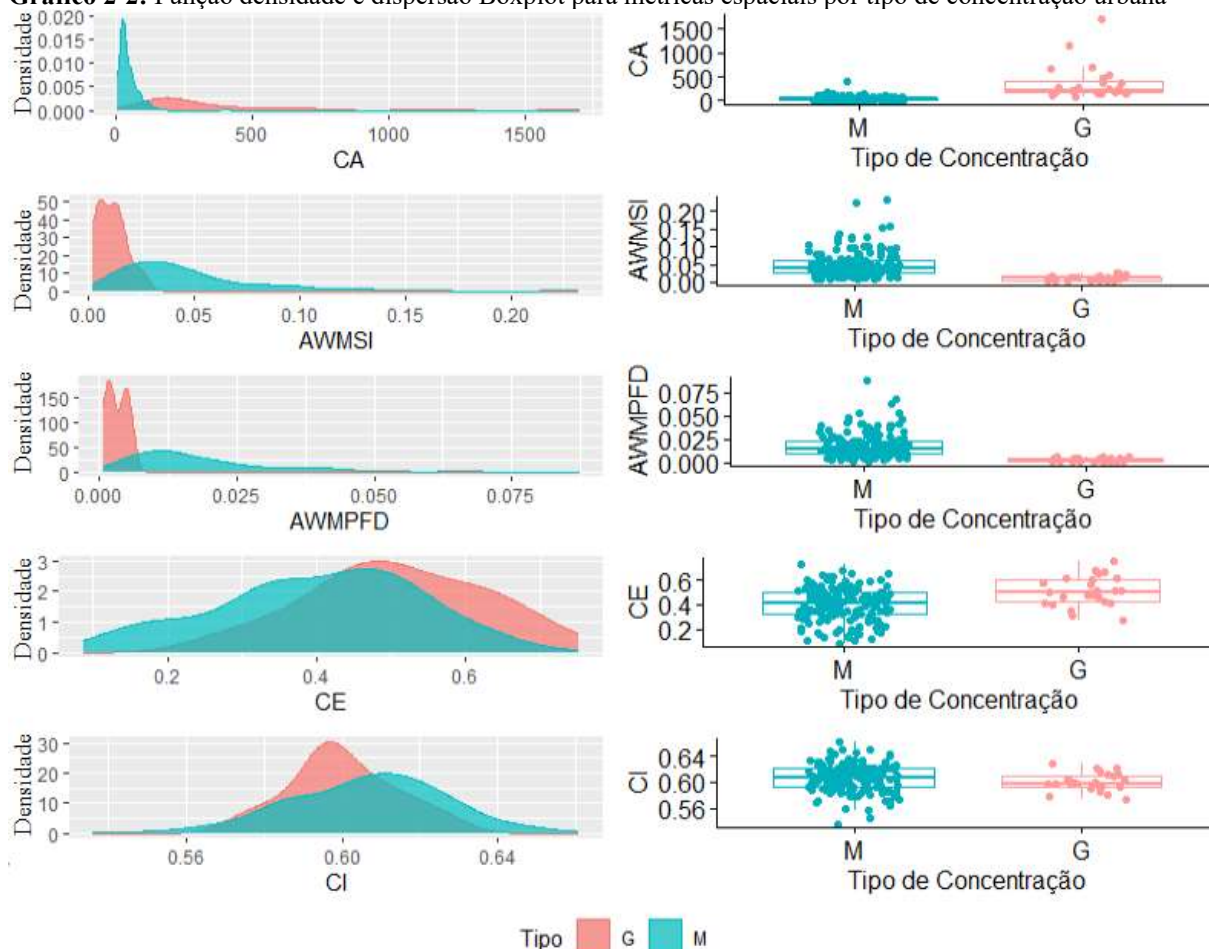
**Tabela 2-7:** Estatísticas descritivas por métrica espacial, tipo de concentração e ano de análise

| <b>Tipo</b>                  | <b>Métrica</b>                            | <b>1985, N =<br/>186<sup>1</sup></b> | <b>1991, N =<br/>187<sup>1</sup></b> | <b>2000, N =<br/>187<sup>1</sup></b> | <b>2010, N =<br/>187<sup>1</sup></b> | <b>2015, N =<br/>187<sup>1</sup></b> | <b>2022, N =<br/>187<sup>1</sup></b> |
|------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| <b>Grandes Concentrações</b> | Extensão Urbana (CA)                      | 164,362<br>(223,444)                 | 214,982<br>(251,768)                 | 321,648<br>(344,633)                 | 374,437<br>(374,838)                 | 403,203<br>(390,257)                 | 424,038<br>(399,927)                 |
|                              | Número de fragmentos                      | 405,667<br>(321,242)                 | 474,167<br>(358,918)                 | 546,042<br>(426,454)                 | 554,083<br>(432,825)                 | 562,208<br>(441,976)                 | 556,792<br>(449,086)                 |
|                              | Complexidade dos fragmentos (AWMSI)       | 0,013<br>(0,007)                     | 0,011<br>(0,006)                     | 0,011<br>(0,006)                     | 0,011<br>(0,007)                     | 0,011<br>(0,007)                     | 0,012<br>(0,008)                     |
|                              | Complexidade dos limites urbanos (AWMPFD) | 0,004<br>(0,002)                     | 0,004<br>(0,002)                     | 0,003<br>(0,002)                     | 0,003<br>(0,002)                     | 0,003<br>(0,002)                     | 0,003<br>(0,002)                     |
|                              | Centralidade (CE)                         | 0,419<br>(0,116)                     | 0,450<br>(0,111)                     | 0,491<br>(0,127)                     | 0,511<br>(0,121)                     | 0,526<br>(0,120)                     | 0,530<br>(0,120)                     |
|                              | Compacidade (CI)                          | 0,618<br>(0,012)                     | 0,616<br>(0,012)                     | 0,607<br>(0,014)                     | 0,600<br>(0,014)                     | 0,600<br>(0,014)                     | 0,595<br>(0,015)                     |
|                              |                                           |                                      |                                      |                                      |                                      |                                      |                                      |
| <b>Médias Concentrações</b>  | Extensão Urbana (CA)                      | 17,751<br>(21,582)                   | 24,241<br>(25,423)                   | 37,239<br>(35,364)                   | 46,151<br>(42,182)                   | 51,555<br>(45,275)                   | 56,417<br>(48,058)                   |
|                              | Número de fragmentos                      | 64,636<br>(52,792)                   | 76,656<br>(60,098)                   | 96,110<br>(78,739)                   | 104,951<br>(88,949)                  | 110,209<br>(95,462)                  | 111,834<br>(99,256)                  |
|                              | Complexidade dos fragmentos (AWMSI)       | 0,067<br>(0,052)                     | 0,056<br>(0,040)                     | 0,050<br>(0,037)                     | 0,048<br>(0,037)                     | 0,046<br>(0,037)                     | 0,049<br>(0,040)                     |
|                              | Complexidade dos limites urbanos (AWMPFD) | 0,029<br>(0,025)                     | 0,023<br>(0,017)                     | 0,019<br>(0,014)                     | 0,018<br>(0,014)                     | 0,018<br>(0,014)                     | 0,018<br>(0,014)                     |
|                              | Centralidade (CE)                         | 0,349<br>(0,137)                     | 0,360<br>(0,139)                     | 0,387<br>(0,137)                     | 0,403<br>(0,139)                     | 0,416<br>(0,139)                     | 0,424<br>(0,139)                     |
|                              | Compacidade (CI)                          | 0,617<br>(0,023)                     | 0,617<br>(0,022)                     | 0,609<br>(0,019)                     | 0,606<br>(0,021)                     | 0,602<br>(0,019)                     | 0,596<br>(0,020)                     |
|                              |                                           |                                      |                                      |                                      |                                      |                                      |                                      |

<sup>1</sup>Média (Desvio-Padrão); <sup>2</sup>Não foi capturada área urbanizada para a concentração urbana de Bragança-PA (código IBGE 1501709) em 1985.

Fonte: Elaboração própria

Visualmente, observa-se uma maior dispersão das métricas espaciais entre as concentrações urbanas médias (Gráfico 2-2). No caso das grandes concentrações, há uma grande concentração de valores nos índices de complexidade dos fragmentos (AWMSI – entre zero e 0,05) e dos limites urbanos (AWPFD – entre zero e 0,010). Há uma maior amplitude nos valores dos índices de centralidade (CE) e compacidade (CI), bem como uma distribuição de frequências mais bem comportada dos indicadores.

**Gráfico 2-2:** Função densidade e dispersão Boxplot para métricas espaciais por tipo de concentração urbana

Notas: CA: extensão urbana; AWMSI: complexidade dos fragmentos; AWMPFD: complexidade dos limites urbanos; CE: centralidade; CI: compacidade.

Fonte: Elaboração própria

Para identificar se há diferenças significativas entre médias das métricas espaciais por tipo de concentração, aplicou-se o teste de médias para o banco de dados referente a 2010 (Tabela 2-8). O teste - t de *Student* é adequado para comparar a diferença entre dois grupos de uma variável, desde que as premissas de independência das observações, normalidade da variável analisada e homogeneidade de variância entre os grupos sejam satisfeitas. Considerando que os dados são independentes, uma vez que cada grupo é composto por informações de concentrações urbanas distintas e não pareadas, procedeu-se à testagem das duas outras hipóteses. Para verificar se as variáveis são distribuídas conforme uma distribuição normal, utilizou-se o teste de *Shapiro-Wilk*<sup>58</sup>, ao passo que a homogeneidade das variâncias foi testada por meio do teste de *Levene*, ambos com funcionamento semelhante ao apresentado nos testes comparativos por região geográfica, porém aplicados a apenas dois grupos.

<sup>58</sup> Versão para duas amostras independentes

São encontradas evidências estatísticas de que seguem uma distribuição normal as variáveis Complexidade dos fragmentos (AWMSI) de grandes concentrações, Centralidade (CE) de grandes e médias concentrações e Compacidade (CI) de grandes e médias concentrações. Adicionalmente, CE e CI também apresentam variâncias homogêneas. Conjuntamente, os testes indicam que a comparação entre médias é mais adequada por meio do teste T de *Student* para CE e CI, enquanto a versão não paramétrica deste teste (Teste de Wilcoxon) deve ser utilizada para a comparação entre médias de CA, AWMSI e AWMPFD.

As comparações de médias sobre as métricas espaciais evidenciam grandes diferenças na forma urbana entre as médias e grandes concentrações (Tabela 2-8). Com exceção da Compacidade (CI), as outras métricas espaciais das concentrações médias foram significativamente diferentes (com intervalo de confiança de 95%) das grandes concentrações. Em geral, as grandes concentrações apresentam formas urbanas menos complexas e mais centralizadas que as concentrações médias.

**Tabela 2-8:** Testes estatísticos para comparação de médias entre concentrações grandes e médias em 2010

| Métrica | Tam | Média   | Desvio-Padrão | Teste de Normalidade Shapiro-Wilk |          | Teste Levene para igualdade das variâncias |          | Testes para igualdade de médias |        |      |         |
|---------|-----|---------|---------------|-----------------------------------|----------|--------------------------------------------|----------|---------------------------------|--------|------|---------|
|         |     |         |               | W                                 | p-valor  | F                                          | p-valor  |                                 | T/W    | d.f. | p-valor |
| CA      | G   | 374,437 | 374,838       | 0,679                             | 0,000*** | 45,821                                     | 0,000*** | Teste t-Student                 | 10,85  | 183  |         |
|         | M   | 46,151  | 42,182        | 0,663                             | 0,000*** |                                            |          | Teste de Wilcoxon               | 3823   |      | 0,000   |
| AWMSI   | G   | 0,011   | 0,007         | 0,935                             | 0,127    | 10,369                                     | 0,002**  | Teste t-Student                 | -4,847 | 183  | 0,000   |
|         | M   | 0,048   | 0,037         | 0,809                             | 0,000*** |                                            |          | Teste de Wilcoxon               | 299    |      | 0,000   |
| AWMPFD  | G   | 0,003   | 0,002         | 0,910                             | 0,035*   | 13,002                                     | 0,000*** | Teste t-Student                 | -5,396 | 183  | 0,000   |
|         | M   | 0,018   | 0,014         | 0,844                             | 0,000*** |                                            |          | Teste de Wilcoxon               | 153    |      | 0,000   |
| CE      | G   | 0,511   | 0,121         | 0,987                             | 0,981    | 0,931                                      | 0,336    | Teste t-Student                 | 3,675  | 183  | 0,000   |
|         | M   | 0,403   | 0,139         | 0,985                             | 0,089    |                                            |          | Teste de Wilcoxon               | 2757   |      | 0,001   |
| CI      | G   | 0,600   | 0,014         | 0,981                             | 0,905    | 4,242                                      | 0,041*   | Teste t-Student                 | -1,391 | 183  | 0,166   |
|         | M   | 0,606   | 0,021         | 0,989                             | 0,252    |                                            |          | Teste de Wilcoxon               | 1495   |      | 0,074   |

Notas: Tam=Tamanho (Grupo); G=Grande; M=Média; CA=Extensão Urbana; AWMSI=Complexidade dos fragmentos; AWMPFD=Complexidade dos limites urbanos; CE=Centralidade; CI=Compacidade

Fonte: Elaboração própria

#### 2.4.4.1. Ranking das grandes concentrações urbanas

Ao observar a ordenação das grandes concentrações urbanas segundo cada indicador, notam-se os diferentes aspectos ligados à forma física das cidades (Tabela 2-9). No que se refere à complexidade dos fragmentos, o indicador aumenta conforme aumenta a complexidade.

Assim, as grandes concentrações com maior complexidade dos fragmentos em 2022 foram Belém/PA (1º), Manaus/AM (2º) e Baixada Santista/SP (3º). Já aquelas que ocupam as últimas posições e têm menor complexidade de fragmentos são Brasília/DF (22º), Rio de Janeiro/RJ (23º), São Paulo/SP (24º), as quais são também as concentrações com maior extensão da área urbanizada. O *ranking* do indicador de complexidade dos limites urbanos é ligeiramente diferente, sendo as mais complexas Baixada Santista/SP (1º), Campo Grande (2º) e João Pessoa/PB (3º) e as menos complexas Belo Horizonte/MG (22º), Rio de Janeiro/RJ (23º), São Paulo/SP (24º).

As primeiras posições do indicador de centralidade são ocupadas por aquelas cujo valor do índice é maior, portanto, as mais centralizadas são Manaus/AM (1º), Goiânia/GO (2º), São Paulo/SP (3º), Curitiba/PR (4º) e Cuiabá/MT (5º). Já as concentrações menos centralizadas são Vitória/ES (18º), Florianópolis/SC (19º), Maceió/AL (20º), Recife/PE (21º), Aracaju/SE (22º), Salvador/BA (23º), Baixada Santista/SP (24º), notadamente cidades litorâneas cuja linearidade tende a ser uma forma imposta por questões geomorfológicas. Já com relação às concentrações mais compactas, ocupam as primeiras posições Teresina/PI (1º), Curitiba/PR (2º), São Paulo/SP (3º), Campo Grande/MS (4º) e Belém/PA (5º). As menos compactas são Sorocaba/SP (20º), Goiânia/GO (21º), Baixada Santista/SP (22º), Vitória/ES (23º) e Maceió/AL (24º).

**Tabela 2-9:** Métricas espaciais por concentração urbana e *ranking*<sup>59</sup> entre as Grandes Concentrações em 2022

| Nome da<br>Concentração | CA       | CA<br>rank | AWM<br>SI | AWMSI<br>rank | AWM<br>PFD | AWMPFD<br>rank | CE    | CE<br>rank | CI    | CI<br>rank |
|-------------------------|----------|------------|-----------|---------------|------------|----------------|-------|------------|-------|------------|
| São Paulo/SP            | 1809,277 | 1          | 0,002     | 24            | 0,001      | 24             | 0,675 | 3          | 0,615 | 3          |
| Rio de Janeiro/RJ       | 1276,548 | 2          | 0,003     | 23            | 0,001      | 23             | 0,472 | 16         | 0,603 | 9          |
| Brasília/DF             | 786,840  | 3          | 0,003     | 22            | 0,001      | 21             | 0,493 | 15         | 0,589 | 16         |
| Belo Horizonte/MG       | 782,870  | 4          | 0,004     | 21            | 0,001      | 22             | 0,607 | 9          | 0,597 | 12         |
| Curitiba/PR             | 588,905  | 5          | 0,004     | 20            | 0,001      | 20             | 0,668 | 4          | 0,619 | 2          |
| Goiânia/GO              | 551,433  | 6          | 0,007     | 16            | 0,002      | 15             | 0,714 | 2          | 0,582 | 21         |
| Fortaleza/CE            | 450,294  | 7          | 0,006     | 17            | 0,002      | 19             | 0,501 | 13         | 0,592 | 15         |
| Campinas/SP             | 427,741  | 8          | 0,008     | 15            | 0,002      | 14             | 0,631 | 7          | 0,583 | 19         |
| Recife/PE               | 346,854  | 9          | 0,005     | 19            | 0,002      | 17             | 0,424 | 21         | 0,599 | 11         |
| Salvador/BA             | 338,707  | 10         | 0,012     | 10            | 0,002      | 18             | 0,341 | 23         | 0,593 | 13         |
| Vitória/ES              | 261,402  | 11         | 0,015     | 8             | 0,004      | 8              | 0,445 | 18         | 0,566 | 23         |
| Manaus                  | 255,511  | 12         | 0,023     | 2             | 0,005      | 7              | 0,755 | 1          | 0,609 | 6          |
| Cuiabá/MT               | 235,301  | 13         | 0,016     | 7             | 0,005      | 6              | 0,652 | 5          | 0,586 | 17         |
| São Luís/MA             | 231,455  | 14         | 0,012     | 11            | 0,003      | 13             | 0,607 | 8          | 0,585 | 18         |
| Belém/PA                | 220,126  | 15         | 0,037     | 1             | 0,005      | 5              | 0,465 | 17         | 0,609 | 5          |
| Campo Grande            | 214,204  | 16         | 0,019     | 4             | 0,007      | 2              | 0,534 | 11         | 0,612 | 4          |
| Baixada Santista/SP     | 203,425  | 17         | 0,023     | 3             | 0,007      | 1              | 0,285 | 24         | 0,575 | 22         |
| Florianópolis/SC        | 199,700  | 18         | 0,006     | 18            | 0,002      | 16             | 0,443 | 19         | 0,605 | 7          |
| Sorocaba/SP             | 194,609  | 19         | 0,012     | 9             | 0,003      | 12             | 0,503 | 12         | 0,582 | 20         |
| Teresina/PI             | 189,541  | 20         | 0,012     | 12            | 0,004      | 9              | 0,635 | 6          | 0,621 | 1          |
| Natal/RN                | 181,330  | 21         | 0,010     | 13            | 0,004      | 10             | 0,537 | 10         | 0,604 | 8          |
| João Pessoa/PB          | 160,082  | 22         | 0,018     | 5             | 0,006      | 3              | 0,494 | 14         | 0,593 | 14         |
| Maceió/AL               | 145,933  | 23         | 0,017     | 6             | 0,006      | 4              | 0,439 | 20         | 0,566 | 24         |
| Aracaju/SE              | 124,823  | 24         | 0,010     | 14            | 0,003      | 11             | 0,391 | 22         | 0,600 | 10         |

Notas: CA=extensão urbana; AWMSI=complexidade dos fragmentos; AWMPFD=complexidade dos limites urbanos; CE=centralidade; CI=compacidade.

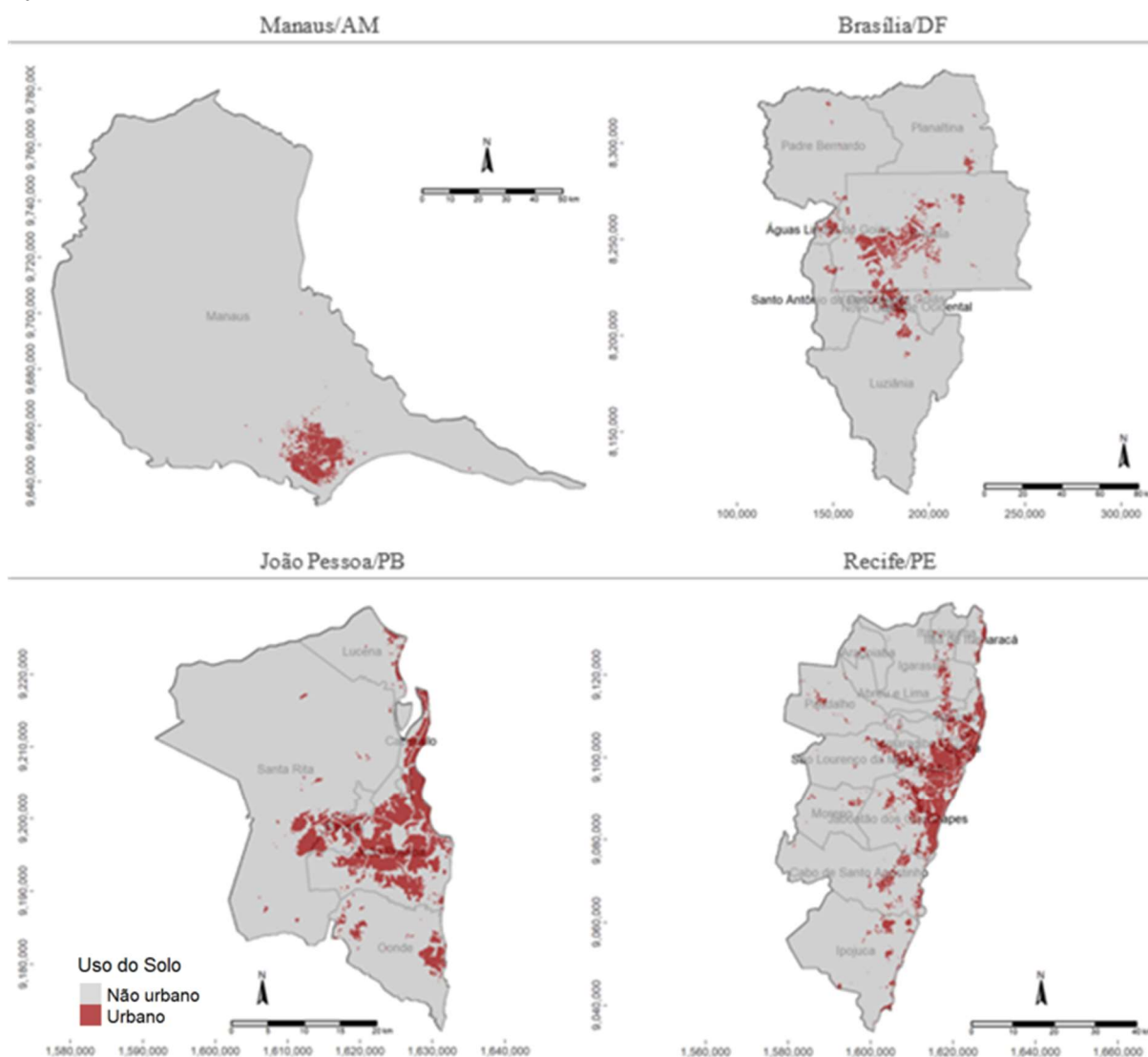
Fonte: Elaboração própria

Os Mapas 2-3 ilustram formas urbanas com diferentes valores para AWMSI e AWMPFD (índices de complexidade) entre as grandes concentrações<sup>60</sup>. O mapa da área urbana de Manaus/AM (esquerda superior) é um exemplo de área com elevada complexidade dos fragmentos, enquanto Brasília/DF (direita superior) ilustra área urbanizada com baixa complexidade dos fragmentos. Com relação à complexidade dos limites urbanos, João Pessoa/PB (esquerda inferior) mostra índice mais elevado, enquanto Recife/PE (direita inferior) fica entre as áreas urbanizadas com índices mais baixos.

<sup>59</sup> *Ranking* feito seguindo a ordenação do maior para o menor valor de cada indicador

<sup>60</sup> Alguns exemplos de áreas urbanizadas em médias concentrações estão contidos no apêndice 2.C. Abaetetuba/PA aparece como um exemplo área urbanizada com elevado índice de complexidade dos fragmentos e dos limites urbanos; Angra dos Reis/RJ tem uma região com baixo índice de centralidade; e Itajubá/MG é uma área urbanizada com elevado índice de compacidade.

**Mapa 2-3:** Formas urbanas com diferentes valores para AWMSI e AWMPFD entre as grandes concentrações – 2022



Notas:

Manaus/AM: área urbanizada com elevada complexidade dos fragmentos;

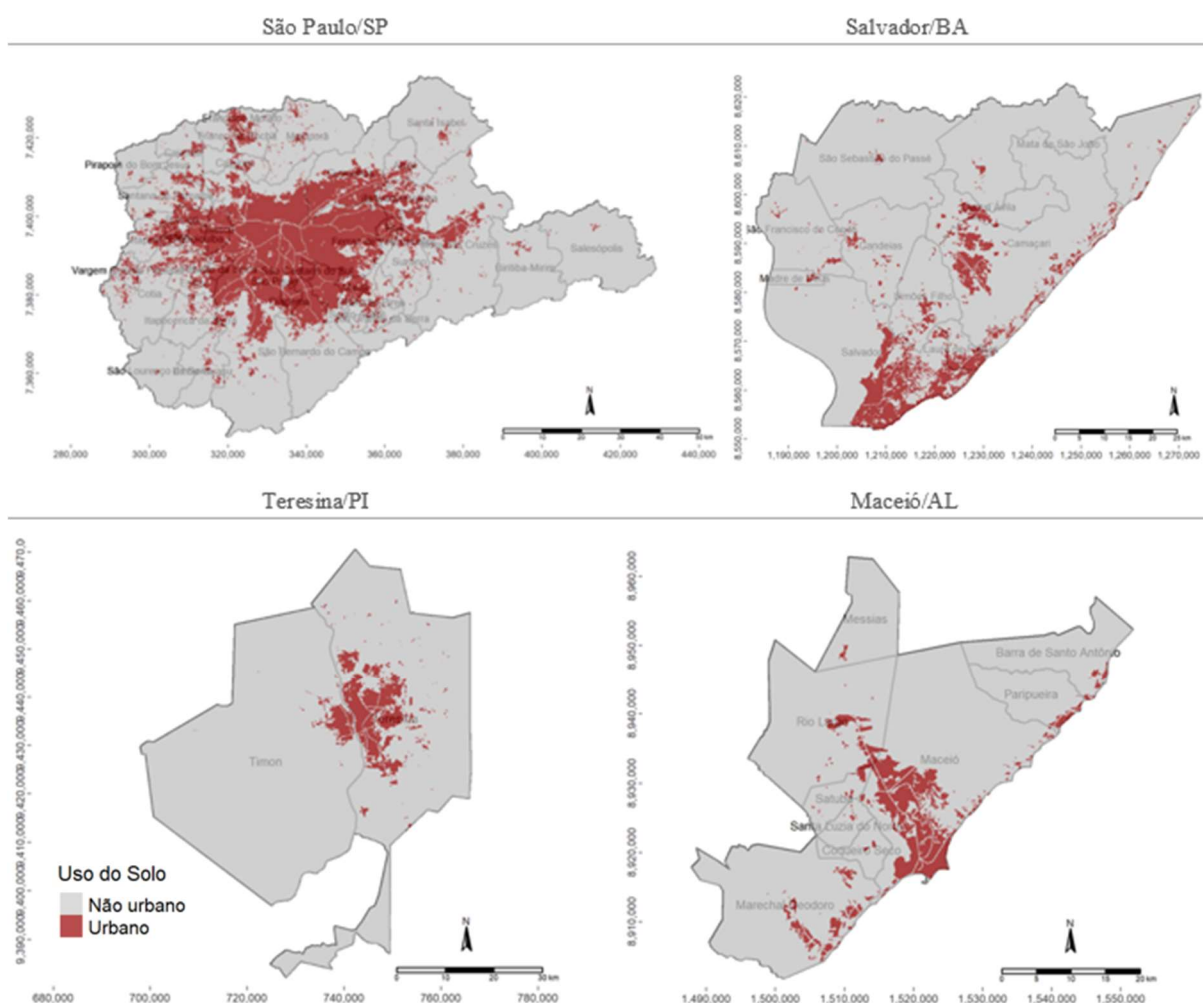
Brasília/DF: área urbanizada com baixa complexidade dos fragmentos;

João Pessoa/PB: área urbanizada com elevada complexidade dos limites urbanos;

Recife/PE: área urbanizada com baixa complexidade dos limites urbanos.

Fonte: Elaboração própria

Já os indicadores de centralidade (CE) e compacidade (CI) estão ilustrados nos Mapas 2-4 para grandes concentrações urbanas. São Paulo/SP é um exemplo de área urbanizada com elevado índice de centralidade, oposta a Salvador/BA, que tem baixo índice de centralidade (ou seja, é mais linearizada). Com relação ao índice de compacidade, Teresina/PI é uma área urbanizada com elevado índice de compacidade, ao passo que Maceió/AL apresenta baixo índice de compacidade.

**Mapa 2-4:** Formas urbanas com diferentes valores para CE e CI entre as grandes concentrações – 2022

Notas:

São Paulo/SP: área urbanizada com elevado índice de centralidade;

Salvador/BA: área urbanizada com baixo índice de centralidade;

Teresina/PI: área urbanizada com elevado índice de compacidade;

Maceió/AL: área urbanizada com baixo índice de compacidade.

Fonte: Elaboração própria

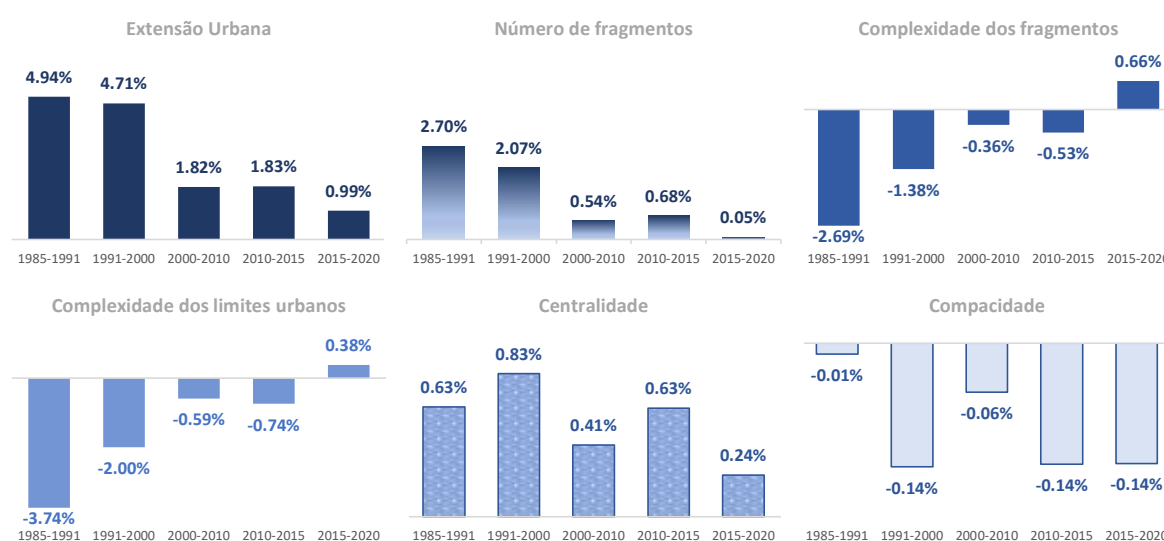
#### 2.4.5. Evolução histórica das métricas espaciais

A evolução dos indicadores ao longo do período considerado (Gráfico 2-3) mostra que a extensão das áreas urbanizadas apresentou taxa média anual de crescimento de 2,9% ao ano (a.a.) no período entre 1985 e 2022. Foi observado elevado crescimento entre 1985 e 1991 (+4,94%) e no período seguinte (+4,71% entre 1991 e 2000). A variação anual média cai para cerca de +1,8% nos dois períodos seguintes (2000-2010 e 2010-2015 e se reduz para +1,0% entre 2015 e 2022, em média. A dinâmica dos indicadores de complexidade evidencia que ambos caíram na média das concentrações até 2015, com quedas mais acentuadas nos anos iniciais. E foi observada uma reversão desta tendência entre 2015 e 2022, quando foi registrado ligeiro aumento tanto na complexidade dos fragmentos (AWMSI) quanto na complexidade dos



limites urbanos (AWMPFD). As áreas urbanizadas das concentrações urbanas ficaram mais centralizadas ao longo do período, com crescimento média de 0,5% no índice de centralidade (CE) entre 1985 e 2022 e pequenas diferenças entre os subperíodos. Com maior centralidade e queda na complexidade de um lado, e ao aumento no número de fragmentos de outro, as áreas urbanizadas registraram praticamente estabilidade no índice de compacidade - CI (ligeira queda de 0,1% entre 1985 e 2022).

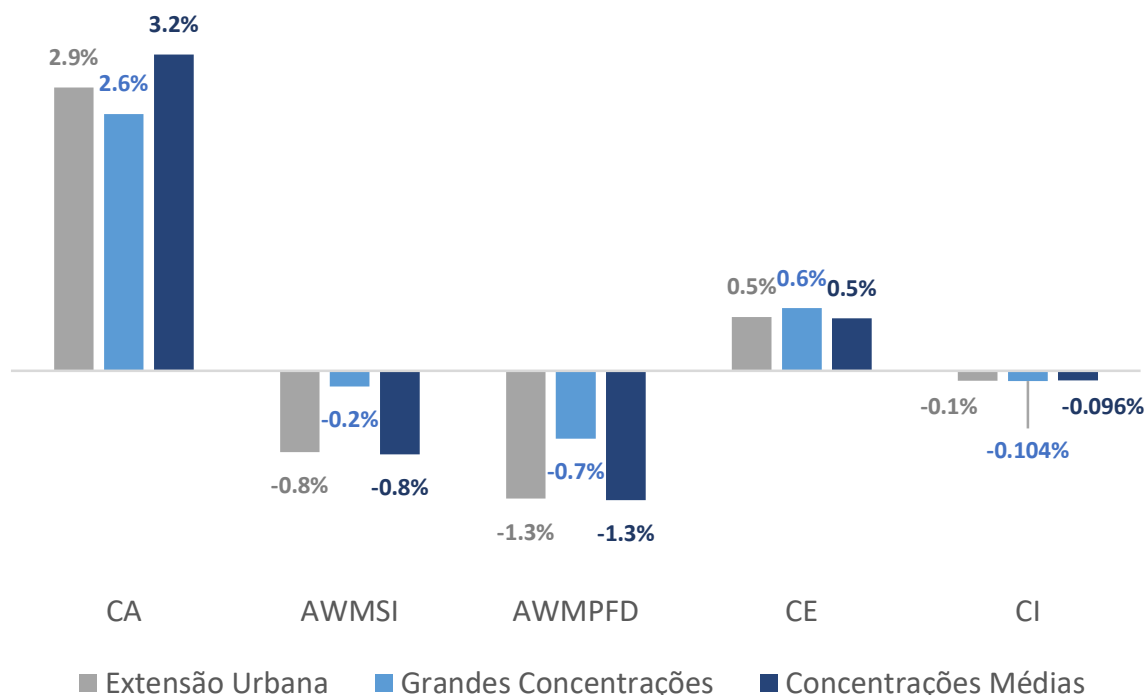
**Gráfico 2-3:** Taxa média de crescimento ao ano nas concentrações urbanas por período



Fonte: Elaboração própria

Um aspecto interessante a se observar é a diferença entre as dinâmicas de grandes e médias concentrações urbanas (Gráfico 2-4). No período como um todo (1985-2022), a taxa anual média da extensão urbana foi de 2,9%, com crescimento mais acentuado das concentrações médias (+3,2%) e ligeiramente mais fraco nas grandes concentrações (+2,6%). Vale notar que as grandes concentrações registraram uma maior desaceleração no período recente, tendo apresentado aumento na área urbanizada de apenas 0,7% entre 2015 e 2022, ao passo que as médias concentrações tiveram alta de 1,3% no mesmo período. Já a complexidade dos fragmentos mostrou redução bem mais acentuada nas concentrações urbanas médias do que nas grandes. Por outro lado, ambas tiveram aumento semelhante no índice de centralidade. Por fim, o índice de compacidade caiu muito brandamente nos dois tipos de concentração, com queda ligeiramente maior registrada nas médias concentrações ao longo de todo o período.

**Gráfico 2-4:** Taxa média de crescimento anual entre 1985 e 2022 dos indicadores de forma urbana por tipo de concentração



Notas:

CA: extensão urbana; AWMSI: complexidade dos fragmentos; AWMPFD: complexidade dos limites urbanos; CE: centralidade; CI: compacidade.

Fonte: Elaboração própria

#### 2.4.6. Correlação entre métricas espaciais e medidas de densidade

Conforme explorado no primeiro artigo deste trabalho, uma medida usual utilizada para capturar os efeitos da forma urbana é a variável densidade demográfica, em sua versão mais simples definida como a razão entre população residente e área total da extensão territorial delimitada por seus limites administrativos. Porém, como a área administrativa pode incluir grandes áreas rurais e também pode ser alterada de um dia para o outro por decreto, uma medida que visa contornar tais problemas é a densidade urbana: razão entre a população urbana nas concentrações urbanas<sup>61</sup> e extensão da área urbana obtida pelo Mapbiomas (em hectares). Com a utilização da variável de população urbana, a medida de densidade urbana fica restrita aos anos em que há informações do Censo Demográfico.

Segundo as informações estimadas, a densidade urbana apresenta correlação positiva com a complexidade, indicando que concentrações urbanas mais densas mostram, por um lado, maior a complexidade dos fragmentos e dos limites urbanos e, por outro lado, menores índices

<sup>61</sup> Obtida pelo IBGE por meio dos Censos Demográficos.

de centralidade. Apesar disso, as concentrações com maior densidade urbana também apresentam maiores índices de compacidade (Tabela 2-10).

**Tabela 2-10:** Análise da correlação de Pearson entre métricas espaciais e medidas de densidade (1991, 2000 e 2010)

|                                    | Complexidade dos fragmentos | Complexidade dos limites urbanos | Centralidade | Compacidade |
|------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|--------------|-------------|
| Densidade demográfica <sup>1</sup> | -0,293***                   | -0,330***                        | 0,317***     | -0,046      |
| Densidade urbana <sup>2</sup>      | 0,177***                    | 0,322***                         | -0,136**     | 0,159***    |

<sup>1</sup> Razão entre a população total e a área territorial dos limites administrativos da concentração urbana (habitantes/hectare)

<sup>2</sup> Razão entre a população urbana e a área urbanizada da concentração urbana (habitantes/hectare)

Fonte: Elaboração própria

#### 2.4.7. Forma urbana e fatores socioeconômicos e ambientais

Considerando os indicadores de densidade e de métricas espaciais como representativos de aspectos da forma urbana, esta seção visa explorar a correlação com fatores socioeconômicos e ambientais. Para fins comparativos, a análise irá se concentrar nas informações referentes a 2010 (Tabela 2-11). Primeiramente, observa-se que a taxa de urbanização (percentual de habitantes que vive em áreas classificadas como urbanas<sup>62</sup> em relação à população total) é positivamente relacionada com a densidade demográfica e com a centralidade, e negativamente relacionada com as medidas de complexidade dos fragmentos e dos limites urbanos. Com relação à prosperidade econômica das regiões, o Produto Interno Bruto (PIB) *per capita*, medido pela razão entre a soma do PIB total dos municípios<sup>63</sup> que compõe a concentração urbana e a população residente, guarda correlação negativa com a densidade urbana, com a complexidade dos fragmentos e com a complexidade dos limites urbanos.

Uma medida que incorpora às questões de riqueza e crescimento econômico dentre outros fatores relacionados à qualidade de vida da população é o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH), originalmente desenvolvido pela Organização das Nações Unidas<sup>64</sup> para diversos países ao redor do mundo. Para a medida no nível das cidades, o Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD), o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) e a Fundação

<sup>62</sup> Parcela da população que reside em área classificada como urbana no respectivo Censo Demográfico. No caso brasileiro, a situação do domicílio é definida por lei municipal, em vigor na data de referência da pesquisa, que estabelece os limites do perímetro urbano. Como situação urbana, consideram-se as áreas internas ao perímetro urbano, ou seja, as áreas urbanizadas, ou não, correspondentes às Cidades (sedes municipais), às Vilas (sedes distritais), ou às Áreas Urbanas Isoladas (Glossário do IBGE).

<sup>63</sup> PIB Municipal - preços de mercado (preços de 2010) - R\$ (mil) dividido pela população <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9088-produto-interno-bruto-dos-municipios.html>

<sup>64</sup> Publicado nos Relatórios do Desenvolvimento Humano do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) desde o início dos anos 1990.

João Pinheiro (FJP) desenvolveram o IDHM brasileiro, composto pelas mesmas três dimensões do IDH Global – longevidade, educação e renda. Os dados, disponíveis pela iniciativa Atlas Brasil<sup>65</sup>, foram coletados por município e agregados para as concentrações urbanas<sup>66</sup>. A análise de correlação com os indicadores de forma urbana revela relação positiva do IDHM com a densidade demográfica e com a centralidade, ao passo que foi identificada correlação negativa com densidade urbana, complexidade dos fragmentos e complexidade dos limites urbanos.

Voltando-se para questões relacionadas aos transportes, importante aspecto associado à forma urbana, duas dimensões foram inseridas nesta análise: dois indicadores de frota de veículos e um indicador de óbitos em acidentes de transporte. A frota total de veículos<sup>67</sup>, estimada pela Senatran e divulgado pelo Ministério do Transporte<sup>68</sup>, foi dividida pela estimativa de população residente para construção do indicador de frota de veículos *per capita*. Foi identificada correlação negativa entre frota de veículos *per capita* e densidade urbana, complexidade dos fragmentos, complexidade dos limites urbanos e compacidade. Por outro lado, o indicador mostrou correlação positiva com o indicador de centralidade. Os sinais e significâncias se mantêm também quando considerada apenas a frota de automóveis *per capita*, sendo adicionada também correção positiva com a densidade demográfica. Já a taxa de óbitos em acidentes de transportes, contabilizada pelo Atlas da Violência<sup>69</sup>, apresenta correlação negativa e significativa com a densidade demográfica e com a densidade urbana.

Por fim, uma investigação relevante deste trabalho diz respeito à relação dos centros urbanos com a questão ambiental. Em particular, enfatiza-se o nível de poluição associado às emissões de gases de efeito estufa (GEE) nas cidades, estimadas pelo Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG). As emissões de GEE associadas a setores essencialmente (resíduos, processos industriais e energia) mostra-se positivamente correlacionada com a densidade demográfica, com a densidade urbana e com a centralidade. Por outro lado, identifica-se relação negativa com a complexidade dos fragmentos e dos limites urbanos.

---

<sup>65</sup> <http://www.atlasbrasil.org.br/acervo/atlas>

<sup>66</sup> Utilizou-se a média ponderada pela população como método de agregação.

<sup>67</sup> Total de veículos considerando automóveis, motocicletas, caminhões e outros.

<sup>68</sup> <https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/conteudo-Senatran/estatisticas-frota-de-veiculos-senatran>

<sup>69</sup> O Atlas da Violência é um portal (<https://www.ipea.gov.br/atlasviolencia/>) que reúne, organiza e disponibiliza informações sobre violência no Brasil, bem como reúne publicações do Ipea sobre violência e segurança pública. Foi criado em 2016 e é gerido pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea) com a colaboração do Fórum Brasileiro de Segurança Pública (FBSP).

**Tabela 2-11:** Análise da correlação de Pearson entre a forma urbana e fatores socioeconômicos e ambientais - 2010

|                                                        | Densidade demográfica | Densidade urbana | Complexidade dos fragmentos | Complexidade dos limites urbanos | Centralidade | Compacidade |
|--------------------------------------------------------|-----------------------|------------------|-----------------------------|----------------------------------|--------------|-------------|
| Taxa de urbanização                                    | 0,310***              | -0,135           | -0,258***                   | -0,400***                        | 0,555***     | -0,061      |
| PIB <i>per capita</i>                                  | 0,123                 | -0,223**         | -0,276***                   | -0,316***                        | 0,093        | -0,058      |
| Índice de Desenvolvimento Humano (IDH)                 | 0,200**               | -0,395***        | -0,350***                   | -0,459***                        | 0,431***     | 0,024       |
| Frota de veículos <i>per capita</i>                    | 0,064                 | -0,168***        | -0,090*                     | -0,131**                         | 0,189***     | -0,138**    |
| Frota de automóveis <i>per capita</i>                  | 0,108*                | -0,159***        | -0,121**                    | -0,163***                        | 0,203***     | -0,122**    |
| Taxa de óbitos em acidentes de transporte <sup>1</sup> | -0,305***             | -0,347***        | -0,079                      | -0,085                           | 0,051        | 0,084       |
| Emissões urbanas de GEE                                | 0,788***              | 0,335***         | -0,298***                   | -0,328***                        | 0,247***     | -0,041      |
| Emissões urbanas de GEE <i>per capita</i>              | -0,01                 | -0,165*          | -0,085                      | -0,111                           | -0,032       | -0,076      |

<sup>1</sup>Taxa por 100 mil habitantes

Fonte: Elaboração própria

#### 2.4.8. Comparação entre métricas por nível de renda e desenvolvimento

A maioria das métricas espaciais diferencia-se não apenas com relação ao tipo de concentração ao qual pertence, mas também em função do nível de renda apresentada. É o que demonstra o comparativo de médias entre concentrações com maior e menor nível de riqueza (Produto Interno Bruto - PIB) per capita, grupos divididos com corte na mediana<sup>70</sup> do PIB per capita entre as concentrações da amostra em 2010. O grupo de concentrações com maior nível de renda per capita apresenta maior extensão urbana (CA), menor complexidade dos fragmentos (AWMSI), menor complexidade dos limites urbanos (AWMPFD) e maior índice de centralidade (CE). A compacidade não mostra diferença estatisticamente significativa entre grupos de maior e menor renda (Tabela 2-12).

<sup>70</sup> A mediana do PIB per capita na amostra é de 19,08 mil reais por pessoa.

**Tabela 2-12:** Testes estatísticos para comparação de médias entre concentrações com maior e menor nível de renda per capita em 2010

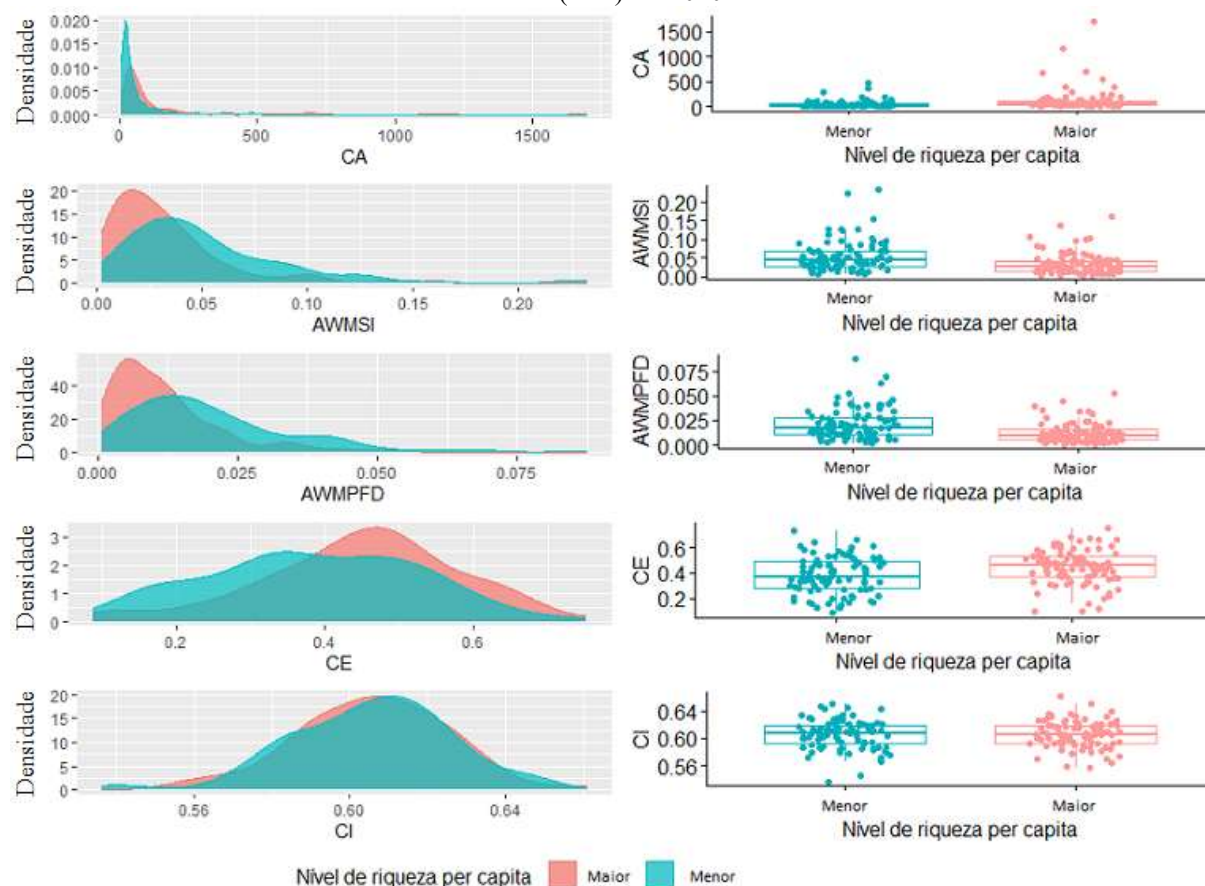
| renda per capita em 2010 |             |         |               |                                   |           |                                            |          |                                 |        |      |         |
|--------------------------|-------------|---------|---------------|-----------------------------------|-----------|--------------------------------------------|----------|---------------------------------|--------|------|---------|
| Métrica                  | Grupo       | Média   | Desvio-Padrão | Teste de Normalidade Shapiro-Wilk |           | Teste Levene para igualdade das variâncias |          | Testes para igualdade de médias |        |      |         |
|                          |             |         |               | W                                 | p-valor   | F                                          | p-valor  |                                 | T/W    | d.f. | p-valor |
| CA                       | Maior renda | 124.307 | 235.583       | 0.436                             | 0.000 *** | 5.184                                      | 0.024 *  | Teste t-Student                 | 2.814  | 183  | 0.005   |
|                          | Menor renda | 52.341  | 72.526        | 0.566                             | 0.000 *** |                                            |          | Teste de Wilcoxon               | 6140   |      |         |
| AWMSI                    | Maior renda | 0.033   | 0.029         | 0.807                             | 0.000 *** | 4.301                                      | 0.040 *  | Teste t-Student                 | -3.827 | 183  | 0.000   |
|                          | Menor renda | 0.053   | 0.041         | 0.821                             | 0.000 *** |                                            |          | Teste de Wilcoxon               | 2696   |      |         |
| AWMPFD                   | Maior renda | 0.012   | 0.010         | 0.845                             | 0.000 *** | 7.710                                      | 0.006 ** | Teste t-Student                 | -4.607 | 183  | 0.000   |
|                          | Menor renda | 0.021   | 0.015         | 0.870                             | 0.000 *** |                                            |          | Teste de Wilcoxon               | 2546   |      |         |
| CE                       | Maior renda | 0.449   | 0.133         | 0.981                             | 0.2013    | 1.513                                      | 0.220    | Teste t-Student                 | 3.289  | 183  | 0.001   |
|                          | Menor renda | 0.382   | 0.141         | 0.985                             | 0.3433    |                                            |          | Teste de Wilcoxon               | 5442   |      |         |
| CI                       | Maior renda | 0.606   | 0.019         | 0.994                             | 0.9695    | 0.195                                      | 0.659    | Teste t-Student                 | 0.210  | 183  | 0.834   |
|                          | Menor renda | 0.605   | 0.021         | 0.9802                            | 0.171     |                                            |          | Teste de Wilcoxon               | 4298   |      |         |

Notas: CA=Extensão Urbana;AWMSI=Complexidade dos fragmentos; AWMPFD=Complexidade dos limites urbanos; CE=Centralidade; CI=Compacidade

Fonte: Elaboração própria

Visualmente, chama atenção a presença de valores extremos no índice de extensão urbana para o grupo de renda per capita mais elevada, bem como a semelhança na distribuição do índice de compacidade (CI) dos dois grupos (maior e menor renda per capita). Adicionalmente, nota-se maior assimetria na distribuição tanto do índice de complexidade dos fragmentos (AWMSI) quanto do índice de complexidade dos limites urbanos (AWMPFD) especialmente para concentrações pertencentes ao grupo de maior renda (Gráfico 2-5).

**Gráfico 2-5:** Função densidade e dispersão Boxplot para métricas espaciais para concentrações urbanas com maior e menor índice de desenvolvimento humano (IDH) em 2010



Notas:

CA: extensão urbana; AWMSI: complexidade dos fragmentos; AWMPFD: complexidade dos limites urbanos; CE: centralidade; CI: compacidade.

Fonte: Elaboração própria

Os resultados são bastante semelhantes quando o grupo analisado é, não mais o PIB per capita, mas o índice de desenvolvimento humano medido pelo IDHM. As concentrações com maior IDHM mostram, em média, maiores extensões urbanas, menores níveis de complexidade dos fragmentos e dos limites urbanos e maior índice de centralidade (Tabela 2-13).

**Tabela 2-13:** Testes estatísticos para comparação de médias entre concentrações com maior e menor nível de desenvolvimento humano em 2010

| Métrica | Grupo     | Média   | Desvio-Padrão | Teste de Normalidade Shapiro-Wilk |           | Teste Levene para igualdade das variâncias |          | Testes para igualdade de médias |        |         |
|---------|-----------|---------|---------------|-----------------------------------|-----------|--------------------------------------------|----------|---------------------------------|--------|---------|
|         |           |         |               | W                                 | p-valor   | F                                          | p-valor  | T/W                             | d.f.   | p-valor |
| CA      | Maior IDH | 124.629 | 236.558       | 0.439                             | 0.000 *** | 5.535                                      | 0.0197 * | Teste t-Student                 | 2.873  | 183     |
|         | Menor IDH | 51.233  | 64.317        | 0.629                             | 0.000 *** |                                            |          | Teste de Wilcoxon               | 6101   | 0.005   |
| AWMSI   | Maior IDH | 0.035   | 0.030         | 0.839                             | 0.000 *** | 2.081                                      | 0.1509   | Teste t-Student                 | -2.933 | 183     |
|         | Menor IDH | 0.051   | 0.041         | 0.799                             | 0.000 *** |                                            |          | Teste de Wilcoxon               | 3090   | 0.004   |
| AWMPFD  | Maior IDH | 0.013   | 0.010         | 0.871                             | 0.000 *** | 5.544                                      | 0.020 *  | Teste t-Student                 | -3.847 | 183     |
|         | Menor IDH | 0.020   | 0.016         | 0.856                             | 0.000 *** |                                            |          | Teste de Wilcoxon               | 2901   | 0.001   |
| CE      | Maior IDH | 0.460   | 0.113         | 0.985                             | 0.380     | 8.569                                      | 0.004 ** | Teste t-Student                 | 4.601  | 183     |
|         | Menor IDH | 0.370   | 0.151         | 0.981                             | 0.201     |                                            |          | Teste de Wilcoxon               | 5857   | 0.000   |
| CI      | Maior IDH | 0.606   | 0.019         | 0.988                             | 0.558     | 1.349                                      | 0.247    | Teste t-Student                 | 0.242  | 183     |
|         | Menor IDH | 0.605   | 0.021         | 0.981                             | 0.210     |                                            |          | Teste de Wilcoxon               | 4369   | 0.809   |
|         |           |         |               |                                   |           |                                            |          |                                 |        | 0.804   |

Notas: CA=Extensão Urbana;AWMSI=Complexidade dos fragmentos; AWMPFD=Complexidade dos limites urbanos; CE=Centralidade; CI=Compacidade

Fonte: Elaboração própria

## 2.5. Considerações finais

Os estudos econômicos que analisam os impactos da forma de expansão urbana costumam se concentrar em alguns aspectos das cidades, notadamente a densidade. Apesar de relevante, há outros aspectos importantes com potencial impacto sobre as condições socioeconômicas e ambientais e que tem se tornado cada vez mais viáveis diante da disponibilidade de imagens de satélite e seu processamento. A proposta do presente trabalho foi explorar as métricas e mapas que abrangem as características espaciais das manchas urbanas. Tendo como base as métricas de paisagem e a metodologia disponível no pacote *landscapemetrics*, calcularam-se indicadores de extensão urbana, complexidade dos fragmentos, complexidade dos limites urbanos, centralidade e compacidade. Foram apresentadas as definições metodológicas para obtenção das métricas relacionadas a cada um desses atributos, com foco na base de dados, processamento e análise descritiva dos resultados para as 187 concentrações urbanas brasileiras de 1985 a 2022.

Os resultados mostram que a área urbana média das concentrações brasileiras passou de 36,69 km<sup>2</sup> em 1985 para 103,60 km<sup>2</sup> em 2022, com São Paulo apresentando a maior extensão e Cametá (PA) a menor. A complexidade dos fragmentos diminuiu ao longo do período, passando de 0,060 em 1985 para 0,044 em 2022, assim como a complexidade dos limites



urbanos, que caiu de 0,026 para 0,016 no mesmo intervalo. Belém/PA é um exemplo de grande concentração cuja área urbanizada apresenta elevada complexidade dos fragmentos, enquanto a Baixada Santista/SP é uma concentração urbana com elevada complexidade dos limites urbanos. O grau de centralidade das concentrações (CE) apresentou média de 0,358 em 1985 e de 0,438 em 2022, enquanto o indicador de compacidade (CI) registrou média de 0,617 em 1985 e de 0,596 em 2022. Concentrações identificadas com elevado índice de centralidade foram Manaus e Goiânia/GO, ao passo que elevados Curitiba/PR e Itajubá/MG mostraram-se altamente compactas. Em sentido oposto, Angra dos Reis (RJ) e Araguaína/TO são exemplos de baixa índice de CE e CI, respectivamente.

A análise de correlação entre as métricas espaciais revela que áreas urbanas mais extensas tendem a ter manchas urbanas com maior número de fragmentos, menos complexidade nos fragmentos e nos limites urbanos e mais centralizadas. As análises regionais indicaram que as métricas espaciais não apresentam, em geral, diferenças significativas entre as regiões geográficas brasileiras. Com relação ao tamanho, observa-se que, em média, as grandes concentrações apresentam formas urbanas menos complexas e mais centralizadas que as concentrações médias, enquanto o grau de compacidade não apresenta diferença entre os dois grupos. Entre 1985 e 2022, a extensão de área urbana em grandes concentrações registrou um crescimento médio anual de área de 2,6%, enquanto em médias concentrações houve crescimento de 3,2% ao ano, ambas com aumento no índice de centralidade e estabilidade na compacidade.

A análise de correlação entre indicadores de forma urbana e fatores socioeconômicos e ambientais indica que concentrações urbanas com maior densidade urbana tendem a apresentar menores níveis de PIB *per capita*, de IDHM, menor frota de veículos e automóveis *per capita*, menores taxas de óbito em acidentes de transporte e maiores emissões urbanas de GEE. Já os níveis de complexidade mais elevados estão associados a concentrações com menores taxa de urbanização, PIB *per capita*, IDHM, frota de veículos e automóveis *per capita* e emissões urbanas de GEE. O indicador de centralidade mostra que concentrações mais centralizadas são também aquelas com maiores taxas de urbanização, IDHM, frota de veículos e automóveis *per capita* e emissões urbanas de GEE. Por fim, as concentrações mais compactas estão associadas a menores frotas de veículos e automóveis *per capita*.

Os dados trazem evidências, ainda, de que as concentrações com maior nível de renda (PIB) *per capita* tendem a apresentar maior extensão urbana (CA), menor complexidade dos fragmentos (AWMSI), menor complexidade dos limites urbanos (AWMPFD) e maior índice

de centralidade (CE), ao passo que a compacidade não mostra diferença estatisticamente significativa em relação ao grupo de menor renda. Os resultados são bastante semelhantes quando o grupo analisado é baseado no grau de desenvolvimento humano medido pelo IDHM. As concentrações com maior IDHM mostram, em média, maiores extensões urbanas, menores níveis de complexidade dos fragmentos e dos limites urbanos e maior índice de centralidade.

Os achados sugerem a potencial importância de se adaptarem políticas urbanas e ambientais que incorporem a complexidade espacial e os impactos ambientais das áreas urbanizadas, especialmente em contextos de crescimento populacional e expansão urbana. Contudo, é necessário realizar estudos adicionais para estabelecer relações causais robustas entre as variáveis analisadas, garantindo que as interpretações não sejam influenciadas por correlações espúrias ou fatores externos não controlados.

## REFERÊNCIAS

- AHLFELDT, G.; PIETROSTEFANI, E.; SCHUMANN, A.; MATSUMOTO, T. **Demystifying compact urban growth: Evidence from 300 studies from across the world**. OECD Regional Development Working Papers, 2018/03, 2018.
- ALBERTI, M. The effects of urban patterns on ecosystem function. **International regional science review**, v. 28, n. 2, p. 168-192, 2005.
- ANGEL, S.; PARENT, J.; CIVCO, D. Urban sprawl metrics: an analysis of global urban expansion using GIS. In: **Proceedings of ASPRS 2007 Annual Conference, Tampa, Florida May**. Citeseer, 2007.
- ANGEL, S.; PARENT, J.; CIVCO, D. L.; BLEI, A. M. **Making Room for a Planet of Cities**. Cambridge, MA: Lincoln Institute of Land Policy, 2011
- Angel, S., Blei, A. M., Civco, D. L., e Parent, J. Atlas of Urban Expansion—Edição 2016, Volume 1: **Areas and Densities**, New York, Nairobi, Cambridge, MA: New York University, UN-Habitat, Lincoln Institute of Land Policy, 2016.
- DE BARROS, M. P. Métricas da paisagem como ferramenta de avaliação dos efeitos da urbanização na estrutura da paisagem: o caso de Cuiabá, Brasil. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 7, n. 4, p. 411-432, 2018.
- MCCLURE, W. R.; BARTUSKA, T. J. (Ed.). **The built environment: a collaborative inquiry into design and planning**. John Wiley & Sons, 2011.
- CARTER, H. **The study of urban geography**. New York: Arnold, 1981.
- CHELOTTI, G.; SANO, E. Sessenta anos de evolução urbana do Distrito Federal analisada por meio de métricas de paisagem. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, 12(1), e10279-e10279, 2023.
- FONSECA, B. M.; RIBAS, R. P.; MOURA, A. C. M. Aplicação dos conceitos e métricas de ecologia da paisagem na gestão da paisagem urbana. **Paisagem e Ambiente**, 38, 71-85, 2016.
- FRENKEL, A.; ASHKENAZI, M. Measuring urban sprawl: how can we deal with it?. **Environment and Planning B: Planning and Design**, v. 35, n. 1, p. 56-79, 2008.
- GALSTER, G.; HANSON, R.; RATCLIFFE, M. R.; WOLMAN, H.; COLEMAN, S.; FREIHAGE, J. Wrestling sprawl to the ground: defining and measuring an elusive concept. **Housing policy debate**, v. 12, n. 4, p. 681-717, 2001.
- GRIMM, N. B.; FAETH, S. H.; GOLUBIEWSKI, N. E.; REDMAN, C. L.; WU, J.; BAI, X.; BRIGGS, J. M. Global change and the ecology of cities. **Science**, v. 319, n. 5864, p. 756-760, 2008.
- GUÉROIS, M.; PUMAIN, D. Built-up encroachment and the urban field: a comparison of forty European cities. **Environment and Planning A**, v. 40, n. 9, p. 2186-2203, 2008.

- HEROLD, M.; SCEPAN, J.; CLARKE, K. C. The use of remote sensing and landscape metrics to describe structures and changes in urban land uses. **Environment and planning A**, v. 34, n. 8, p. 1443-1458, 2002.
- HESSELBARTH, M. H.; SCIAINI, M.; WITH, K. A.; WIEGAND, K.; NOWOSAD, J. *landscapemetrics*: an open-source R tool to calculate landscape metrics. **Ecography**, v. 42, n. 10, p. 1648-1657, 2019.
- HUANG, J.; LU, X. X.; SELLERS, J. M. A global comparative analysis of urban form: Applying spatial metrics and remote sensing. **Landscape and urban planning**, v. 82, n. 4, p. 184-197, 2007.
- JENKS, M.; BURTON, E.; WILLIAMS, K. Compact cities and sustainability: An introduction. **The Compact City: a sustainable urban form**, p. 11-12, 1996.
- KAZA, N. The changing urban landscape of the continental United States. **Landscape and Urban Planning**, v. 110, p. 74-86, 2013.
- KASANKO, M.; BARREDO, J. I.; LAVALLE, C.; MCCORMICK, N.; DEMICHELI, L.; SAGRIS, V.; BREZGER, A. Are European cities becoming dispersed?: A comparative analysis of 15 European urban areas. **Landscape and urban planning**, v. 77, n. 1-2, p. 111-130, 2006.
- KHEIRKHAH, Z.; MEHR, M. N. Elements and indicators of urban form: A meta-synthesis study. **Space Ontology International Journal**, v. 2, n. 2, p. 45, 2021.
- LI, X.; YEH, A. G. Analyzing spatial restructuring of land use patterns in a fast growing region using remote sensing and GIS. **Landscape and Urban planning**, v. 69, n. 4, p. 335-354, 2004.
- LONGLEY, P. A.; MESEV, V. On the measurement and generalisation of urban form. **Environment and planning A**, v. 32, n. 3, p. 473-488, 2000.
- MCGARIGAL, K.; MARKS, B. J. Spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure. **Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-351. US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station**, v. 10, p. 1-122, 1995.
- METZGER, J. P. O que é ecologia de paisagens? **Biota neotropica**, v. 1, p. 1-9, 2001.
- NADALIN, V.; IGLIORI D. Espraçamento urbano e periferação da pobreza na região metropolitana de São Paulo: evidências empíricas. **EURE**, Santiago, 41.124, 91-111, 2016.
- OJIMA, Ricardo. **Análise comparativa da dispersão urbana nas aglomerações urbanas brasileiras: elementos teóricos e metodológicos para o planejamento urbano e ambiental**. Tese (Doutorado em Demografia) – Instituto de Filosofia e Ciências Humanas da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.
- O'NEILL, R. V.; KRUMMEL, J. R.; GARDNER, R. E. A.; SUGIHARA, G.; JACKSON, B.; DEANGELIS, D. L.; ... ; GRAHAM, R. L. Indices of landscape pattern. **Landscape ecology**, v. 1, p. 153-162, 1988.
- PAGANI, R. N.; KOVALESKI, J. L.; RESENDE, L. M. Methodi Ordinatio: a proposed methodology to select and rank relevant scientific papers encompassing the impact factor, number of citation, and year of publication. **Scientometrics**, v. 105, n. 3, p. 2109–2135, 2015.

- PAGANI, R. N.; KOVALESKI, J. L.; RESENDE, L. M. M. Advances in the composition of methodi ordinatio for systematic literature review. **Ciencia da Informacao**, v. 46, n. 2, p. 161–187, 2017.
- PEREIRA, R. H. M.; NADALIN, V.; MONASTERIO, L.; ALBUQUERQUE, P. H. Urban centrality: a simple index. **Geographical analysis**, 45(1), 77-89, 2013.
- SACULINGGAN, M.; BALASE, E. A. Empirical power comparison of goodness of fit tests for normality in the presence of outliers. **Journal of physics: Conference series**, 435, 012041. IOP Publishing, 2013.
- SCHNEIDER, A.; WOODCOCK, C.E. Compact, dispersed, fragmented, extensive? a comparison of urban growth in twenty-five global cities using remotely sensed data, pattern metrics and census information. **Urban Stud**, 45 (3), 659–692, 2008.
- SCHWARZ, Nina. Urban form revisited—Selecting indicators for characterising European cities. **Landscape and urban planning**, v. 96, n. 1, p. 29-47, 2010.
- SOILLE, Pierre; VOGT, Peter. Morphological segmentation of binary patterns. **Pattern recognition letters**, v. 30, n. 4, p. 456-459, 2009.
- SOUZA, U. D. V. **Transformação espacial na região dos Lençóis Maranhenses: identificação e análise utilizando as geotecnologias**. 2023. Tese (Doutorado) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, 2023.
- TOPRAK, T. E. Analysis of differences between groups. The t-test and the analysis of variance (ANOVA) in language assessment. In: ARYADOUST, V.; RAQUEL, M. (Ed.). **Quantitative data analysis for language assessment volume I: Fundamental techniques**. Routledge, 2019, p. 179 a 197.
- TSAI, Yu-Hsin. Quantifying urban form: compactness versus' sprawl'. **Urban studies**, v. 42, n. 1, p. 141-161, 2005.
- WENG,Q.; LIU, H.; LU, D. Assessing the effects of land use and land cover patterns on thermal conditions using landscape metrics in City of Indianapolis, United States. **Urban Ecosyst**, 10 (2), 203–219, 2007.
- WIENS, John A. Population responses to patchy environments. **Annual review of ecology and systematics**, p. 81-120, 1976.
- Xu, C.; Liu, M.; Zhang, C.; An, S; Yu, W.; Chen, J. M.. The spatiotemporal dynamics of rapid urban growth in the Nanjing metropolitan region of China. **Landscape ecology**, v. 22, p. 925-937, 2007.

## APÊNDICES

### APÊNDICE 2.A. Revisão sistemática da literatura

O propósito deste apêndice é detalhar os critérios utilizados para a revisão sistemática da literatura sobre o tema da Forma urbana e Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE). Para conduzir essa revisão, o método utilizado foi o *Methodi Ordinatio*, desenvolvido por Pagani, Kovaleski e Resende (2015) e refinado posteriormente pelos pesquisadores em 2017. A escolha desse método se deve à sua organização precisa das referências e à capacidade de aplicar vários critérios para avaliar a importância de cada estudo. Com o aumento significativo de publicações nas principais bases bibliográficas, esse método possibilita selecionar uma gama sólida de referências de forma rápida e eficaz. A abordagem também respeita a autonomia do pesquisador, permitindo a definição de critérios adicionais na seleção de artigos e a inclusão de outras pesquisas relevantes conforme o conhecimento prévio e o progresso nas leituras do pesquisador.

Foram aplicadas na presente pesquisa 9 etapas sugeridas a partir dessa metodologia.

- 1) Estabelecimento da intenção da pesquisa:
- 2) Pesquisa preliminar e definição das palavras-chave nas bases de dados:
- 3) Definição das bases de dados a serem utilizadas:
- 4) Definição do gerenciador de referências:
- 5) Procedimentos de filtragem:
- 6) Identificação do fator de impacto, ano de publicação e número de citações:
- 7) Classificação dos artigos utilizando o *InOrdinatio*:
- 8) Localização do texto em formato integral
- 9) Leitura sistemática e análise dos artigos

Abaixo será detalhada a sistematização da busca em cada plataforma individualmente.

Na base de dados da *Web of Science*, os critérios básicos de filtros aplicados são descritos na Tabela 2.A-1. Após diversos testes para definição das palavras-chave, definiu-se um conjunto de elementos capaz de abranger as diferentes nomenclaturas e variações identificadas, bem como a exclusão do que tangencia o tema, mas está fora do escopo do presente trabalho.

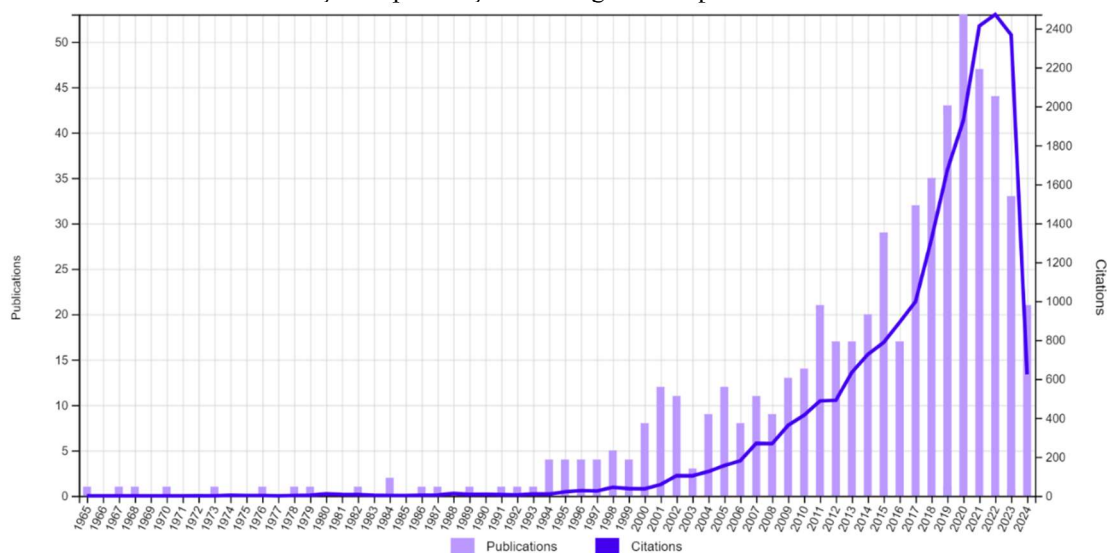
Após definição das palavras-chave, foram realizadas três buscas. A primeira, sem nenhum tipo de filtro, resultou em 52.087 documentos. Na segunda busca, aplicou-se o filtro “Tipos de documento: Artigo or Artigo de revisão”, tendo sido obtidos 48.170 documentos. Por fim, a terceira e última busca resultou em 581 documentos e contou com os filtros: “Áreas de pesquisa: Business Economics” e “Tipos de documento: Artigo or Artigo de revisão”.

**Tabela 2.A-1:** Buscas por palavras-chave, filtro e número de documentos encontrados

| Data de realização da busca | Busca                                                                                                                       | Filtros                                          | Nº documentos |
|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------|
| 08/05/2024                  | ((Form OR Shape OR Urban* OR Density OR compact* OR sprawl) AND ((Spatial OR Landscape) AND Metric*) OR "Spatial Patterns") | (sem filtros)                                    | 52,087        |
| 08/05/2024                  | ((Form OR Shape OR Urban* OR Density OR compact* OR sprawl) AND ((Spatial OR Landscape) AND Metric*) OR "Spatial Patterns") | Tipos de documento: Artigo or Artigo de revisão. | 48,170        |
| 08/05/2024                  | ((Form OR Shape OR Urban* OR Density OR compact* OR sprawl) AND ((Spatial OR Landscape) AND Metric*) OR "Spatial Patterns") | "Áreas de pesquisa: Business Economics.          |               |

Fonte: Elaboração própria

Após a aplicação dos critérios descritos na Tabela 2.A-1, procedeu-se com a execução de buscas na plataforma de dados *Web of Science*. O total de 581 artigos gerado foi considerado para análise bibliométrica, sem nenhuma exclusão. A evolução do número de citações e publicações ao longo do tempo mostra um aumento do interesse acadêmico no tema nas duas últimas décadas, com grande aumento do número de publicações principalmente entre 2017 e 2020 (Gráfico 2.A-1).

**Gráfico 2.A-1:** Número de citações e publicações ao longo do tempo

Fonte: Web of Science, com base em busca própria

Os resultados da busca foram exportados por meio do relatório de citações fornecido pela Web of Science. A análise permite identificar a principais fontes de publicações em termos de número de documentos e citações (Tabela 2.A-2), bem como os principais autores ou grupo de autores (Tabela 2.A-3).

**Tabela 2.A-2:** Principais revistas com publicações no tema, por número de documentos e citações

| Publicação                                         | Citações | Documentos |
|----------------------------------------------------|----------|------------|
| JOURNAL OF TRANSPORT GEOGRAPHY                     | 2077     | 70         |
| REGIONAL STUDIES                                   | 1314     | 32         |
| ECOLOGICAL ECONOMICS                               | 1307     | 19         |
| JOURNAL OF ECONOMETRICS                            | 1254     | 2          |
| TOURISM MANAGEMENT                                 | 1245     | 14         |
| JOURNAL OF ECONOMIC GEOGRAPHY                      | 898      | 8          |
| TIJDSCHRIFT VOOR ECONOMISCHE EN SOCIALE GEOGRAFIE  | 821      | 45         |
| TRANSPORTATION RESEARCH PART A-POLICY AND PRACTICE | 573      | 14         |
| RESEARCH POLICY                                    | 572      | 6          |
| JOURNAL OF URBAN ECONOMICS                         | 561      | 12         |
| ECONOMIC GEOGRAPHY                                 | 550      | 8          |
| ENERGY POLICY                                      | 539      | 11         |
| JOURNAL OF REGIONAL SCIENCE                        | 536      | 8          |
| ANNALS OF REGIONAL SCIENCE                         | 440      | 16         |
| QUARTERLY JOURNAL OF ECONOMICS                     | 438      | 1          |
| TRANSPORTATION RESEARCH PART B-METHODOLOGICAL      | 429      | 6          |
| ECONOMETRICA                                       | 295      | 1          |
| PAPERS IN REGIONAL SCIENCE                         | 294      | 17         |
| LAND ECONOMICS                                     | 275      | 6          |
| IMF ECONOMIC REVIEW                                | 268      | 1          |

**Tabela 2.A-3:** Principais autores e grupo de autores, por número de documentos e citações

| Autores                                                                                          | Citações | Documentos |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|------------|
| Conley, TG                                                                                       | 1077     | 1          |
| Puga, Diego                                                                                      | 458      | 1          |
| Tabellini, Guido                                                                                 | 438      | 1          |
| Gutierrez, Javier; Carlos Garcia-Palomares, Juan; Romanillos, Gustavo; Henar Salas-Olmedo, Maria | 398      | 1          |
| Hoekman, Jarno; Frenken, Koen; Tijssen, Robert J. W.                                             | 362      | 1          |
| Wang, Jiaoe; Mo, Huihui; Wang, Fahui; Jin, Fengjun                                               | 331      | 1          |
| Sutton, PC; Costanza, R                                                                          | 330      | 1          |
| CASE, AC                                                                                         | 295      | 1          |
| Neutens, Tijs                                                                                    | 285      | 1          |
| Ji, Yuxuan; Geroliminis, Nikolas                                                                 | 283      | 1          |
| Verburg, Peter H.; Eickhout, Bas; van Meijl, Hans                                                | 283      | 1          |
| Graziano, Marcello; Gillingham, Kenneth                                                          | 271      | 1          |
| Jorda, Oscar; Schularick, Moritz; Taylor, Alan M.                                                | 268      | 1          |
| Powell, WW; Koput, KW; Bowie, JI; Smith-Doerr, L                                                 | 268      | 1          |
| Jayachandran, Seema                                                                              | 221      | 1          |
| KEEBLE, D; WALKER, S                                                                             | 217      | 1          |
| Sims, Katharine R. E.                                                                            | 216      | 2          |
| Harrison, B; Kelley, MR; Gant, J                                                                 | 213      | 1          |
| Rey, SJ; Janikas, MV                                                                             | 208      | 1          |
| Malecki, EJ                                                                                      | 182      | 1          |



Após a análise bibliométrica básica, todos os artigos inclusos neste portfólio foram analisados por meio de leituras de títulos para identificar aqueles que possuem um alinhamento ao tema de pesquisa. Exemplos de títulos não alinhados são: “*Grocery store accessibility: Different metrics - Different modal disparity results and spatial patterns*” (Du, QY; Wu, C; Ye, XY; Ren, F; Lin, YJ, 2018) e “*Spatial Patterns in Fiscal Impacts of Environmental Taxation in the EU*” (Paszto, V; Zimmermannová, J; Skalicková, J; Sági, J, 2020). Foram identificados 48 artigos com títulos alinhados.

Esses artigos selecionados foram ordenados conforme valores de *InOrdination* para definir uma ordem de relevância entre os mesmos. Fez-se, então, a leitura dos Abstracts desses 48 artigos, o que levou à seleção de 15 artigos realmente alinhados ao tema de pesquisa. A seleção pelo *Abstract* permitiu, por exemplo, a exclusão de artigos como “*GMM estimation with cross sectional dependence*” de Conley, TG (1999), o qual apresenta um modelo espacial de dependência entre agentes utilizando uma métrica de distância econômica, as quais fornecem dados transversais com uma estrutura semelhante à fornecida pelo índice temporal em dados de séries temporais. Os 15 artigos finais, listados na Tabela 2.A-4, foram selecionados para aprofundamento da leitura, juntamente com os trabalhos selecionados via Scopus, a serem apresentados na próxima seção.

**Tabela 2.A-4:** Resultado final da seleção de artigos com base no Methodi Ordination e filtros próprios (continua)

| Ordenação | Artigos selecionados (autores, ano, revista)                                                                     | Fator de Impacto | Citações | Ano de Publicação |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----------|-------------------|
| 1         | Zambon, I; Benedetti, A; Ferrara, C; Salvati, L, 2018, ECOLOGICAL ECONOMICS                                      | 6.536            | 154      | 2018              |
| 2         | Kaza, N, 2020, ENERGY POLICY                                                                                     | 7.576            | 41       | 2020              |
| 3         | Peng, D; Wang, ZQ; Jiang, MH; Kong, QX, 2023, FINANCE RESEARCH LETTERS                                           | 9.848            | 2        | 2023              |
| 4         | Broto, VC, 2017, ENERGY POLICY                                                                                   | 7.576            | 59       | 2017              |
| 5         | Bertram, C; Goebel, J; Krekel, C; Rehdanz, K, 2022, LAND ECONOMICS                                               | 2.03             | 4        | 2022              |
| 6         | Dhanaraj, K; Angadi, DP, 2022, ASIA-PACIFIC JOURNAL OF REGIONAL SCIENCE                                          | 0                | 3        | 2022              |
| 7         | Du, QY; Wu, C; Ye, XY; Ren, F; Lin, YJ, 2018, TIJDSCHRIFT VOOR ECONOMISCHE EN SOCIALE GEOGRAFIE                  | 4.194            | 19       | 2018              |
| 8         | Lagarias, A; Sayas, J, 2019, REVUE D ECONOMIE REGIONALE ET URBAINE                                               | 0                | 5        | 2019              |
| 9         | Kizos, T; Tsilimigkas, G; Karampela, S, 2017, TIJDSCHRIFT VOOR ECONOMISCHE EN SOCIALE GEOGRAFIE                  | 4.194            | 19       | 2017              |
| 10        | Zhang, WD; Wrenn, DH; Irwin, EG, 2017, JOURNAL OF ECONOMIC GEOGRAPHY                                             | 5.117            | 17       | 2017              |
| 11        | Soria-Lara, JA; Aguilera-Benavente, F; Arranz-López, A, 2016, TRANSPORTATION RESEARCH PART A-POLICY AND PRACTICE | 6.615            | 25       | 2016              |

| (continua) |                                                         |                  |          |                   |
|------------|---------------------------------------------------------|------------------|----------|-------------------|
| Ordenação  | Artigos selecionados (autores, ano, revista)            | Fator de Impacto | Citações | Ano de Publicação |
| 12         | Salvati, L, 2019, REVUE D ECONOMIE REGIONALE ET URBAINE | 0                | 0        | 2019              |
| 13         | Clark, TA, 2013, ENERGY POLICY                          | 7.576            | 47       | 2013              |
| 14         | Monastiriotis, V, 2009, EMPIRICAL ECONOMICS             | 2.647            | 20       | 2009              |
| 15         | SMALL, KA; SONG, SF, 1994, JOURNAL OF URBAN ECONOMICS   | 5.456            | 159      | 1994              |

Fonte: Elaboração própria

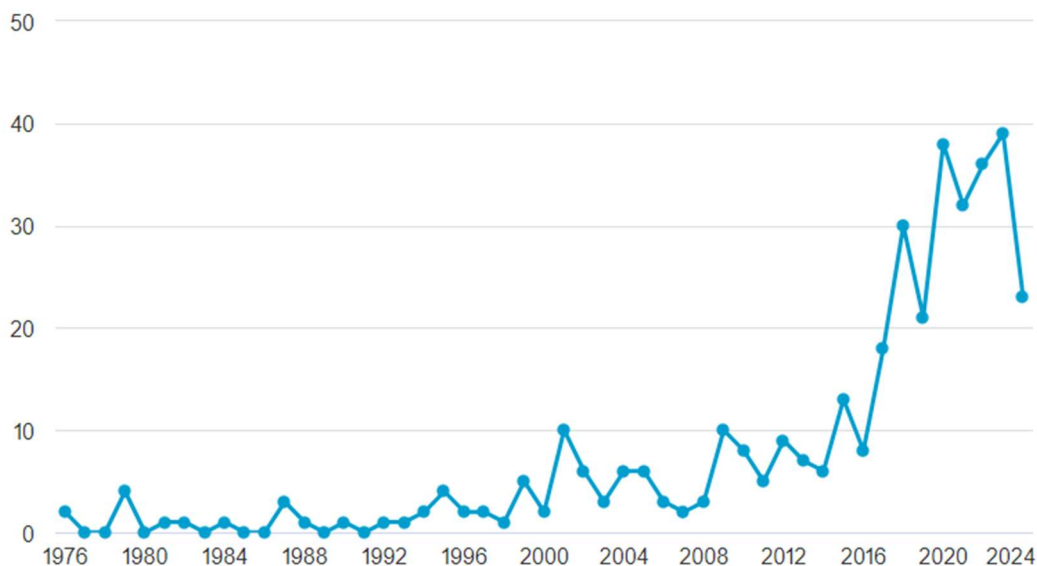
Na base de dados da *Scopus*, os critérios básicos de filtros aplicados são descritos na Tabela 2.A-5. As palavras-chave usadas na base *Web of Science* tiveram boa aderência também na *Scopus*. Novamente, foram realizadas três buscas. A primeira, sem nenhum tipo de filtro, resultou em 32.771 documentos. Na segunda busca, aplicou-se o filtro “Tipos de documento: Artigo or Artigo de revisão”, tendo sido obtidos 28.373 documentos. Por fim, a terceira e última busca resultou em 376 documentos e contou com os filtros: “*Subject area: Economics, Econometrics and Finance*” e “*Document Type: Article or Review*”.

**Tabela 2.A-5:** Buscas por palavras-chave, filtro e número de documentos encontrados

| Data de realização da busca | Busca                                                                                                                       | Filtros                                          | Nº documentos |
|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------|
| 08/05/2024                  | ((Form OR Shape OR Urban* OR Density OR compact* OR sprawl) AND ((Spatial OR Landscape) AND Metric*)) OR “Spatial Patterns” | (sem filtros)                                    | 32,771        |
| 08/05/2024                  | ((Form OR Shape OR Urban* OR Density OR compact* OR sprawl) AND ((Spatial OR Landscape) AND Metric*)) OR “Spatial Patterns” | Tipos de documento: Artigo or Artigo de revisão. | 28,373        |
| 08/05/2024                  | ((Form OR Shape OR Urban* OR Density OR compact* OR sprawl) AND ((Spatial OR Landscape) AND Metric*)) OR “Spatial Patterns” | "Document Type: Article or Review                | 376           |

Fonte: Elaboração própria

Após a aplicação dos critérios descritos na Tabela 2.A-5, procedeu-se com a execução de buscas na plataforma de dados *Scopus*. O total de 376 artigos resultantes, 87 duplicados foram excluídos, por terem sido identificados na busca da *Web of Science*. A análise da evolução do número de documentos por ano evidencia um aumento recente do interesse acadêmico no tema, especialmente nos últimos seis anos (Gráfico 2.A-2).

**Gráfico 2.A-2:** Número de documentos por ano

Fonte: Scopus, com base em busca própria

Após a análise bibliométrica básica, todos os artigos inclusos neste portfólio foram analisados por meio de leituras de títulos para identificar aqueles que possuem um alinhamento ao tema de pesquisa. Exemplos de títulos não alinhados são: “*Spatial Mapping of Gated Community-Based Housing Formations around Metro Stations at the Time of COVID-19 and a Residents’ View*” (Gokce D.; Topcuoglu F., 2023) e “*Coupling coordination analysis and Spatiotemporal heterogeneity between data elements and green development in China*” (Tao C.-Q.; Yi M.-Y.; Wang C.-S., 2023). Foram identificados 48 artigos com títulos alinhados.

Esses artigos selecionados foram ordenados conforme valores de *InOrdination* para definir uma ordem de relevância entre os mesmos. Fez-se, então, a leitura dos Abstracts desses 48 artigos, o que levou à seleção de 13 artigos que abordam o tema forma urbana e sua quantificação por meio de métricas. A seleção pelo *Abstract* permitiu, por exemplo, a exclusão de artigos como “*Urban restructuring and the location dynamics of P-KIBS in postsocialist Belgrade*” de Budović A. (2023), o qual investiga a relação entre a forma urbana densa e a distribuição de instalações comunitárias na cidade velha de Fuzhou, China, utilizando medições baseadas em caminhadas e busca compreender como a densidade urbana influencia a acessibilidade e a distribuição de serviços comunitários. Os 13 artigos finais, listados na Tabela 2.A-6, foram selecionados para aprofundamento da leitura, juntamente com os trabalhos selecionados via Web of Science.

**Tabela 2.A-6:** Resultado final da seleção de artigos com base no *Methodi Ordinatio* e filtros próprios

| Ordenação | Artigos selecionados (autores, ano, revista)                                                                        | Fator de Impacto | Citações | Ano de Publicação |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----------|-------------------|
| 1         | Wang G.; Deng X.; Wang J.; Zhang F.; Liang S., 2019, <i>China Economic Review</i>                                   | 2.299            | 96       | 2019              |
| 2         | Mostafazadeh R.; Talebi Khiavi H., 2024, <i>Environment, Development and Sustainability</i>                         | 1.291            | 1        | 2024              |
| 3         | Bozkurt S.G.; Basaraner M., 2024, <i>Environment, Development and Sustainability</i>                                | 1.291            | 0        | 2024              |
| 4         | Xue L.-M.; Zheng Z.-X.; Meng S.; Li M.; Li H.; Chen J.-M., 2022, <i>Environment, Development and Sustainability</i> | 1.291            | 17       | 2022              |
| 5         | Kumar S.; Ghosh S.; Singh S., 2022, <i>Environment, Development and Sustainability</i>                              | 1.291            | 13       | 2022              |
| 6         | Mohabey D.P.; Nongkynrih J.M.; Kumar U., 2023, <i>Environment, Development and Sustainability</i>                   | 1.291            | 1        | 2023              |
| 7         | He L.; Tao J.; Meng P.; Chen D.; Yan M.; Vasa L., 2021, <i>Oeconomia Copernicana</i>                                | 1.536            | 19       | 2021              |
| 8         | Shen Z.; Xu X.; Narigala; Wang S., 2022, <i>Resources Science</i>                                                   | 0                | 5        | 2022              |
| 9         | Picard P.M.; Tran T.T.H., 2021, <i>Journal of Environmental Economics and Management</i>                            | 2.046            | 7        | 2021              |
| 10        | Shifaw E.; Sha J.; Li X.; Jiali S.; Bao Z., 2020, <i>Environment, Development and Sustainability</i>                | 1.291            | 9        | 2020              |
| 11        | Chettry V.; Surawar M., 2021, <i>Environment, Development and Sustainability</i>                                    | 1.291            | 28       | 2021              |
| 12        | Huang J.; Lin J.; Tu Z., 2010, <i>Environment, Development and Sustainability</i>                                   | 1.291            | 13       | 2010              |
| 13        | Salvati L., 2015, <i>International Journal of Ecological Economics and Statistics</i>                               | 0                | 2        | 2015              |

Fonte: Elaboração própria

Com base nos resultados obtidos nas duas bases de dados pelo *Methodi Ordinatio* e em uma posterior análise criteriosa dos artigos selecionados, chegou-se a uma seleção final de trabalhos empíricos mais relevantes para o propósito da presente pesquisa. Importante salientar que a revisão da literatura não se restringe aos artigos selecionados por estas duas bases, tendo sido adicionadas novas fontes encontradas nas referências de leitura *a posteriori* ou a partir de outros métodos, como indicação de outros pesquisadores, novas publicações ou buscadores alternativos, a exemplo do Google Scholar.

## APÊNDICE 2.B. Metodologia detalhada para cálculo das métricas espaciais

**Tabela 2.B-1:** População total, urbana e rural e grau de urbanização por município:

|    | Município              | População<br>Total | População<br>urbana | População rural | Urbanização |
|----|------------------------|--------------------|---------------------|-----------------|-------------|
| 1  | São Paulo              | 11,253,503         | 11,161,977          | 91,526          | 99%         |
| 2  | Guarulhos              | 1,221,979          | 1,217,280           | 4,699           | 100%        |
| 3  | São Bernardo do Campo  | 765,463            | 728,552             | 36,911          | 95%         |
| 4  | Santo André            | 676,407            | 673,068             | 3,339           | 100%        |
| 5  | Osasco                 | 666,740            | 666,740             | -               | 100%        |
| 6  | Mauá                   | 417,064            | 417,064             | -               | 100%        |
| 7  | Mogi das Cruzes        | 387,779            | 352,607             | 35,172          | 91%         |
| 8  | Diadema                | 386,089            | 386,089             | -               | 100%        |
| 9  | Carapicuíba            | 369,584            | 369,584             | -               | 100%        |
| 10 | Itaquaquecetuba        | 321,770            | 321,770             | -               | 100%        |
| 11 | Suzano                 | 262,480            | 254,020             | 8,460           | 97%         |
| 12 | Taboão da Serra        | 244,528            | 244,528             | -               | 100%        |
| 13 | Barueri                | 240,749            | 240,294             | 455             | 100%        |
| 14 | Embu                   | 240,230            | 240,230             | -               | 100%        |
| 15 | Cotia                  | 201,150            | 161,821             | 39,329          | 80%         |
| 16 | Itapevi                | 200,769            | 200,769             | -               | 100%        |
| 17 | Ferraz de Vasconcelos  | 168,306            | 163,982             | 4,324           | 97%         |
| 18 | Francisco Morato       | 154,472            | 151,748             | 2,724           | 98%         |
| 19 | Itapecerica da Serra   | 152,614            | 131,664             | 20,950          | 86%         |
| 20 | São Caetano do Sul     | 149,263            | 149,263             | -               | 100%        |
| 21 | Franco da Rocha        | 131,604            | 120,105             | 11,499          | 91%         |
| 22 | Ribeirão Pires         | 113,068            | 113,068             | -               | 100%        |
| 23 | Santana de Parnaíba    | 108,813            | 76,470              | 32,343          | 70%         |
| 24 | Jandira                | 108,344            | 108,344             | -               | 100%        |
| 25 | Poá                    | 106,013            | 104,945             | 1,068           | 99%         |
| 26 | Caieiras               | 86,529             | 84,386              | 2,143           | 98%         |
| 27 | Mairiporã              | 80,956             | 70,776              | 10,180          | 87%         |
| 28 | Arujá                  | 74,905             | 71,916              | 2,989           | 96%         |
| 29 | Cajamar                | 64,114             | 58,916              | 5,198           | 92%         |
| 30 | Embu-Guaçu             | 62,769             | 38,856              | 23,913          | 62%         |
| 31 | Santa Isabel           | 50,453             | 39,591              | 10,862          | 78%         |
| 32 | Rio Grande da Serra    | 43,974             | 43,974              | -               | 100%        |
| 33 | Vargem Grande Paulista | 42,997             | 42,997              | -               | 100%        |
| 34 | Biritiba-Mirim         | 28,575             | 19,211              | 9,364           | 67%         |
| 35 | Pirapora do Bom Jesus  | 15,733             | 2,811               | 12,922          | 18%         |
| 36 | Salesópolis            | 15,635             | 9,954               | 5,681           | 64%         |
| 37 | São Lourenço da Serra  | 13,973             | 4,612               | 9,361           | 33%         |

Fonte: IBGE/IPEA (pacote geobr)

**Tabela 2.B-2:** Métricas de paisagem disponíveis no pacote *landscapemetrics* tipo de métrica - Nível do fragmento (*patch*)

| Tipo                 | Acrônimo | Métrica                             |
|----------------------|----------|-------------------------------------|
| aggregation metric   | enn      | euclidean nearest neighbor distance |
| area and edge metric | area     | patch area                          |
|                      | gyrate   | radius of gyration                  |
|                      | perim    | patch perimeter                     |
| core area metric     | cai      | core area index                     |
|                      | core     | core area                           |
|                      | ncore    | number of core areas                |
| shape metric         | circle   | related circumscribing circle       |
|                      | contig   | contiguity index                    |
|                      | frac     | fractal dimension index             |
|                      | para     | perimeter-area ratio                |
|                      | shape    | shape index                         |

Fonte: Hesselbarth *et al.*, 2019

**Quadro 2.B-1:** Principais métricas de paisagem urbana, fórmula e definição

| Métrica                                        | Fórmula                                                                                                                                                            | Definição                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Área urbana total                              | $\sum_{Pi \in C} a_i$<br>em que $a_i$ de é a área do fragmento (patch) $P_i$ e $C$ é a concentração urbana                                                         | A área urbana total é essencialmente a soma das células classificadas como 'urbanas'. Uma grande área urbana total reflete um alto nível de urbanização                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Número de fragmentos (patches)                 | $N \equiv \sum_{Pi \in C} 1$                                                                                                                                       | Um baixo número de fragmentos reflete a contiguidade da urbanização e uma compactação do padrão urbano dentro da própria paisagem.                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Área média dos fragmentos (patches)            | $\bar{a} \equiv \frac{\sum_{Pi \in C} a_i}{N}$                                                                                                                     | Uma alta área média de fragmento indica a presença de grandes subdivisões ou bairros, enquanto valores baixos indicam pequenos desenvolvimentos dispersos.                                                                                                                                                                                                                                               |
| Desvio-padrão da área dos fragmentos (patches) | $\sqrt{\frac{\sum_{Pi \in C} (a_i - \bar{a})^2}{N - 1}}$                                                                                                           | O desvio padrão da área do fragmento reflete a distribuição dos tamanhos dos fragmentos. Valores altos indicam diferenças significativas nos tamanhos dos desenvolvimentos, enquanto valores baixos indicam tamanhos semelhantes.                                                                                                                                                                        |
| Índice médio da forma                          | $\frac{1}{N} \sum_{Pi \in C} \frac{p_i}{q_i}$<br>em que $p_i$ e $q_i$ são o perímetro do fragmento (patch) $P_i$ e um fragmento maximamente compacto de mesma área | O índice de forma é uma razão entre o perímetro real de um fragmento e o fragmento do mesmo tamanho que é maximamente compacto, e varia de 1 a $\infty$ , com 1 sendo o índice para um fragmento com forma quadrada. O índice de forma médio é a média dos índices de forma dos fragmentos na concentração urbana. Neste índice, valores baixos refletem a compactação dos desenvolvimentos individuais. |
| Dimensão fractal média                         | $\frac{\sum_{Pi \in C} 2 \ln (0.25 p_i) / \ln (a_i)}{N}$                                                                                                           | A dimensão fractal é o indicador da complexidade da forma e varia entre 1 e 2, sendo 2 um indicador de que as formas de desenvolvimento preenchem a área.                                                                                                                                                                                                                                                |

Fonte: Kaza (2013)

**Tabela 2.B-3:** Fontes de informações de áreas urbanizadas no Brasil – Mapbiomas e IBGE

| Fonte           | Definição                                                                                                                                                                                                         | Imagens de origem                                                      | Resolução Espacial | Formato disponível | Sistema de Referência de Coordenadas (CRS)   |             |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|----------------------------------------------|-------------|
|                 |                                                                                                                                                                                                                   |                                                                        |                    |                    | Unidades                                     | Datum       |
| IBGE 2019       | Interpretação visual de características urbanas, identificadas de acordo com os elementos de forma específica (geometria dos objetos) e padrão (arranjo espacial)                                                 | Sentinel 2                                                             | 10m                | Shapefile          | Ângulos - Sistema de Coordenadas Geográficas | SIRGA S2000 |
| Mapbiomas Col.8 | O mapeamento de Áreas Urbanas do Mapbiomas adota um método de classificação de aprendizado de máquina supervisionado aplicado às imagens <i>Landsat</i> , resultando em mapas anuais de cobertura e uso da terra. | <i>Landsat</i> 5, <i>Landsat</i> 7, <i>Landsat</i> 8, <i>Landsat</i> 9 | 30m                | RasterLayer        | Ângulos - Sistema de Coordenadas Geográficas | WGS84       |

Fonte: Elaboração própria baseada em Mapbiomas col.8, 2022; IBGE, 2019

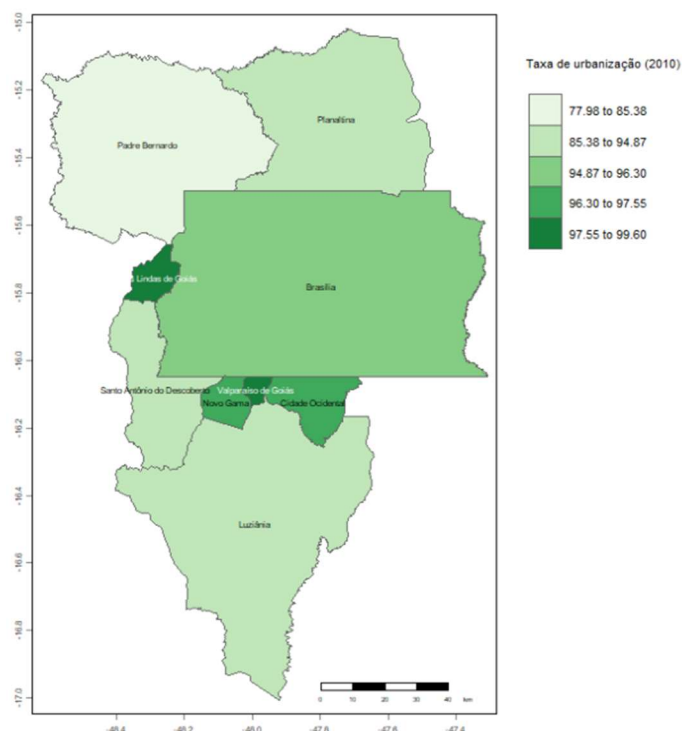
**Quadro 2.B-2:** Códigos da legenda para os valores de pixel na Coleção 8 do MapBiomias

| COLEÇÃO 8 - CLASSES                      | ID | Código hexadecimal | Cor |
|------------------------------------------|----|--------------------|-----|
| <b>1. Floresta</b>                       | 1  | #32a65e            |     |
| 1.1 Formação Florestal                   | 3  | #1f8d49            |     |
| 1.2. Formação Savânica                   | 4  | #7dc975            |     |
| 1.3. Mangue                              | 5  | #04381d            |     |
| 1.4. Floresta Alagável (beta)            | 6  | #026975            |     |
| 1.5. Restinga Arbórea                    | 49 | #02d659            |     |
| <b>2. Formação Natural não Florestal</b> | 10 | #ad975a            |     |
| 2.1. Campo Alagado e Área Pantanosa      | 11 | #519799            |     |
| 2.2. Formação Campestre                  | 12 | #d6bc74            |     |
| 2.3. Apicum                              | 32 | #fc8114            |     |
| 2.4. Afloramento Rochoso                 | 29 | #ffaa5f            |     |
| 2.5. Restinga Herbácea                   | 50 | #ad5100            |     |
| 2.6. Outras Formações não Florestais     | 13 | #d89f5c            |     |
| <b>3. Agropecuária</b>                   | 14 | #FFFFB2            |     |
| 3.1. Pastagem                            | 15 | #edde8e            |     |
| 3.2. Agricultura                         | 18 | #E974ED            |     |
| 3.2.1. Lavoura Temporária                | 19 | #C27BA0            |     |
| 3.2.1.1. Soja                            | 39 | #f5b3c8            |     |
| 3.2.1.2. Cana                            | 20 | #db7093            |     |
| 3.2.1.3. Arroz                           | 40 | #c71585            |     |
| 3.2.1.4. Algodão (beta)                  | 62 | #ff69b4            |     |
| 3.2.1.5. Outras Lavouras Temporárias     | 41 | #f54ca9            |     |
| 3.2.2. Lavoura Perene                    | 36 | #d082de            |     |
| 3.2.2.1. Café                            | 46 | #d68fe2            |     |
| 3.2.2.2. Citrus                          | 47 | #9932cc            |     |
| 3.2.2.3. Dendê (beta)                    | 35 | #9065d0            |     |
| 3.2.2.4. Outras Lavouras Perenes         | 48 | #e6ccff            |     |
| 3.3. Silvicultura                        | 9  | #7a5900            |     |
| 3.4. Mosaico de Usos                     | 21 | #ffefc3            |     |
| <b>4. Área não Vegetada</b>              | 22 | #d4271e            |     |
| 4.1. Praia, Duna e Areal                 | 23 | #ffa07a            |     |
| 4.2. Área Urbanizada                     | 24 | #d4271e            |     |
| 4.3. Mineração                           | 30 | #9c0027            |     |
| 4.4. Outras Áreas não Vegetadas          | 25 | #db4d4f            |     |
| <b>5. Corpo D'água</b>                   | 26 | #0000FF            |     |
| 5.1 Rio, Lago e Oceano                   | 33 | #2532e4            |     |
| 5.2 Aquicultura                          | 31 | #091077            |     |
| 6. Não observado                         | 27 | #ffffff            |     |

Fonte: Mapbiomas col.8, 2022

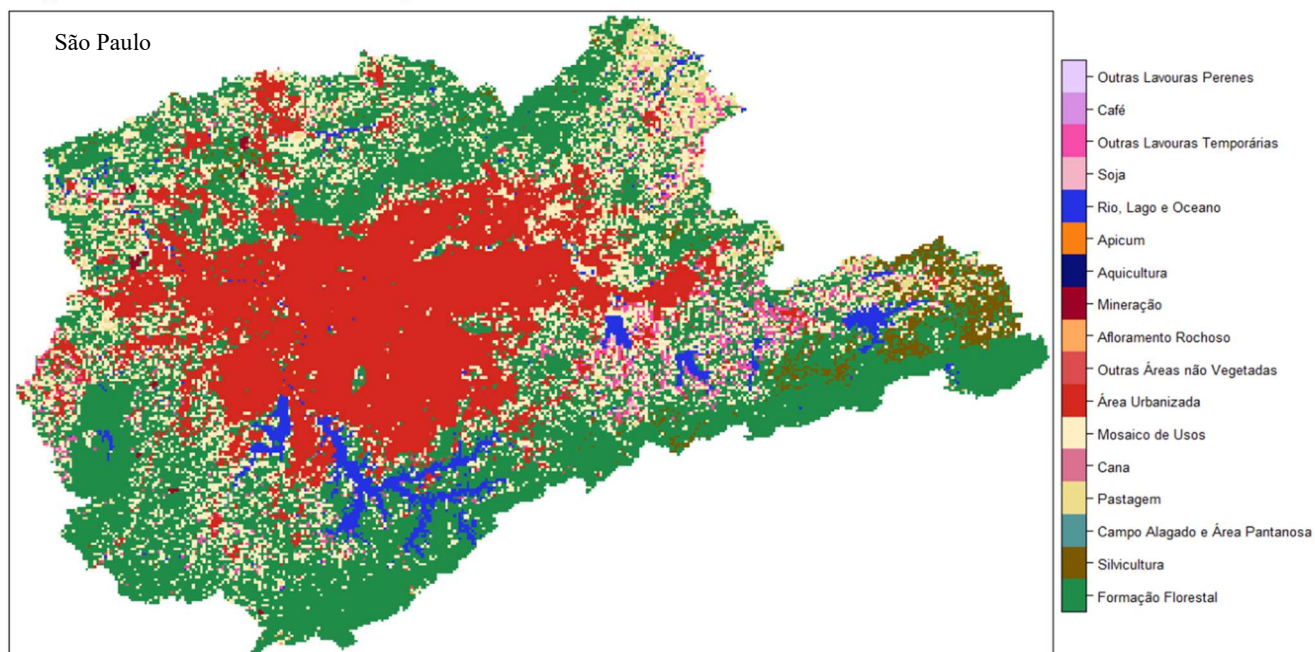


**Mapa 2.B-1:** Limites administrativos e taxa de urbanização dos municípios pertencentes à concentração urbana de Brasília



Fonte: Elaboração própria com base nos dados de IBGE/IPEA (pacote geobr)

**Mapa 2.B-2:** Cobertura de uso e ocupação do solo na concentração urbana de São Paulo em 2022



Fonte: Elaboração própria com base nos dados o MapBiomias e do geobr

## Sistema de Referência de Coordenadas (CRS)

Os dados geoespaciais, sejam eles um objeto do tipo vetor ou *raster*, são considerados espaciais apenas se tiverem um Sistema de Referência de Coordenadas, ou do inglês *Coordinate Reference System (CRS)*. Segundo Silva *et al.* (2022), o CRS é composto por dois principais elementos. Primeiramente, os tipos de unidades utilizadas para a representação geográfica, que podem ser ângulos ou metros, definindo o Sistema de Coordenadas Geográficas e o Sistema de Coordenadas Projetadas, respectivamente. O segundo elemento é o *datum*, que estabelece a relação do sistema de coordenadas (geográfico ou projetado) com a superfície da Terra. Este componente faz parte da Cartografia, especificamente da Geodésia, que estuda a forma e dimensões da Terra, o campo gravitacional e a localização de pontos fixos e sistemas de coordenadas.

Portanto, é possível afirmar que toda informação gerada em um sistema de informação geográfica (SIG) está organizada em um dos dois sistemas existentes: Sistemas de Coordenadas Geográficas (ou Geodésicas) ou Sistemas de Coordenadas Planas (ou Projetadas). No Geoprocessamento, todos os temas devem ser projetados em um desses dois sistemas de referência (Quadro 2.B-3).

**Quadro 2.B-3:** Sistemas Referência de Coordenadas

| SISTEMAS DE COORDENADAS | PROJEÇÃO                | DATUM HORIZONTAL                                              | COORDENADAS               |
|-------------------------|-------------------------|---------------------------------------------------------------|---------------------------|
| Geográficas             | Não se aplica           | WGS 1984, SIRGAS 2000, SAD 1969, NAD 27, Córrego Alegre, etc. | Graus, Minutos e Segundos |
| Planas                  | UTM, Cônica, Polar, etc | WGS 1984, SIRGAS 2000, SAD 1969, NAD 27, Córrego Alegre, etc. | Cartesianas               |

Fonte: Portal Software Público Brasileiro<sup>71</sup>

Alguns dos pré-requisitos essenciais para o cálculo de métricas da paisagem<sup>72</sup> são que os dados georreferenciados estejam em um sistema de referência de coordenadas projetado, com as unidades celulares em metros. Isto porque o Sistema de Coordenadas Geográficas, cujas unidades são representadas em graus (unidades angulares), não é um sistema conveniente para aplicações em que se busca cálculos como distância e áreas. O Sistema de Coordenadas Planas

<sup>71</sup> <https://softwarepublico.gov.br/gitlab/gsan/geosan/wikis/ProjecoesCartograficasUtilizadasNoBrasil>

<sup>72</sup> Pré-requisitos do pacote Landscape metrics (Fonte: [file:///C:/Users/Dell/Downloads/Manuscript\\_Ecography\\_RG.pdf](file:///C:/Users/Dell/Downloads/Manuscript_Ecography_RG.pdf)):

1. Sistema de referência de coordenadas projetado
2. Unidades celulares em metros
3. Classes decodificadas como valores inteiros
4. Número de valores diferentes é razoável (em outras palavras, se estão presentes classes discretas de cobertura do solo).

é o mais adequado neste caso. O Quadro 2.B-4 expõe algumas particularidades que cada sistema possui e sua adequação a cada aplicação.

**Quadro 2.B-4:** Características dos Sistemas de Coordenadas

| SISTEMA GEODÉSICO                                                          | SISTEMA PLANO UTM                                                                                                     |
|----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Utilizado para grandes extensões de área.                                  | Utilizado para pequenas extensões de área.                                                                            |
| Maior distorção (menor precisão).                                          | Menor distorção (maior precisão).                                                                                     |
| A posição das coordenadas nunca se altera.                                 | No Sistema Plano UTM, cada Fuso possui sua própria coordenada.                                                        |
| É necessário fornecer o Datum para trabalhar neste Sistema de Coordenadas. | É necessário fornecer o Datum, o Fuso e o Hemisfério para trabalhar neste Sistema de Coordenadas.                     |
| Para raster, é possível criar mosaicos de grandes extensões.               | Para raster, não é possível criar mosaicos de grandes extensões no Sistema Plano UTM por causa da diferença de Fusos. |
| Os dados são gerados em graus (unidades angulares).                        | Os dados são gerados em metros (unidades lineares).                                                                   |

Fonte: Portal Software Público Brasileiro<sup>73</sup>

É necessário, portanto, que se faça a mudança no sistema de coordenadas, que originalmente é geográfica, com unidades em graus (*datum* WGS84). Os dados foram reprojitados utilizando-se como referência a projeção UTM (zona 23S). Conforme documentação do IBGE a respeito de informações sobre posicionamento geodésico:

*“As coordenadas referidas a um determinado Sistema de Referência Geodésico, podem ser representadas no plano através nas componentes Norte e Leste e são o tipo de coordenadas regularmente encontrado em mapas. Para representar as feições de uma superfície curva em plana são necessárias formulações matemáticas chamadas de Projeções. Diferentes projeções poderão ser utilizadas na confecção de mapas, no Brasil a projeção mais utilizada é a Universal Transversa de Mercator UTM”<sup>74</sup>.*

Os dados do tipo *raster* foram reprojitados utilizando a função *projectRaster*, do pacote *raster: Geographic Data Analysis and Modeling*, com resolução determinada em 30 x 30 m, código EPSG 32723, referente à projeção UTM, *datum* WGS84 e o método 'ngb' (vizinhança mais próxima), usado para calcular valores para o novo RasterLayer em para variáveis categóricas. Já os dados vetoriais foram transformados utilizando a função *st\_transform* do pacote *sf: Simple Features for R*, com mesmo código EPSG como referência.

Seleção da classe “área urbanizada”

O objetivo do presente estudo é estudar a paisagem urbana. Para tanto, é necessário extrair a informação de área urbana do mapa de classificação de uso do solo. Os mapas da extensão urbana das concentrações podem ser criados usando os pixels identificados como “área

<sup>73</sup> <https://softwarepublico.gov.br/gitlab/gsan/geosan/wikis/ProjecoesCartograficasUtilizadasNoBrasil>

<sup>74</sup> [https://geoftp.ibge.gov.br/informacoes\\_sobre\\_posicionamento\\_geodesico/sirgas/sisref\\_2.pdf](https://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_sobre_posicionamento_geodesico/sirgas/sisref_2.pdf)

urbanizada” pelo MapBiomias. Assim, os *pixels* de área urbanizada são classificados como classe um (1) e todos os demais pixels como classe zero (0), ou seja, classe não urbanizada. Tal procedimento foi realizado utilizando-se a função *reclassify* do pacote *raster*.

Outros ajustes – rodovias, elemento estruturante e outliers

A análise da paisagem urbana parte da identificação de áreas conectadas, as quais são identificadas como um único fragmento (*patch*). Essa definição de fragmento será importante para descrever a paisagem. Por exemplo, uma paisagem composta por muitos fragmentos de pequena extensão é uma paisagem mais fragmentada, enquanto que um baixo número de fragmentos reflete a contiguidade da urbanização e uma compactação do padrão urbano dentro da própria paisagem.

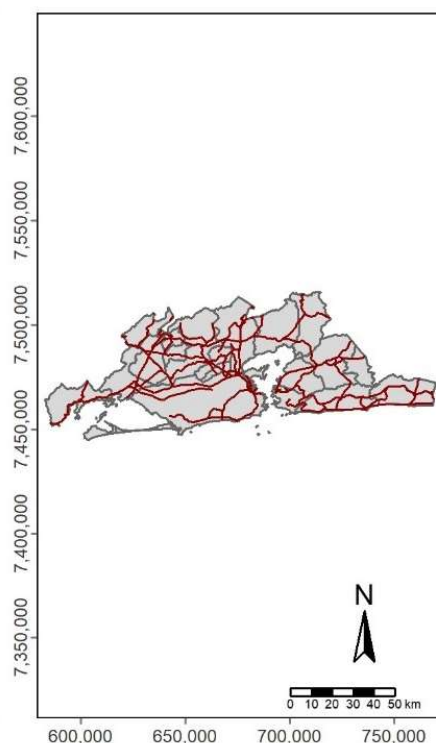
Ocorre que uma paisagem composta por fragmentos muito elevados pode não estar refletindo uma real contiguidade da paisagem. Regiões distintas de uma cidade podem estar conectadas por estradas. Se estas estradas são grandes e largas, tem-se então uma área que aparece contínua no *raster*, mas que impõe uma importante desconexão do ponto de vista do uso da cidade por seus habitantes. Evidências de que isto podem ser vistas quando a área das células em um dos fragmentos é substancialmente maior do que o próximo maior fragmento. Isso significa que a maior parte da área urbana neste *raster* está conectada e forma um único fragmento.

Para resolver esse problema, este trabalho segue metodologia proposta por Kaza (2013), que consiste em utilizar um arquivo vetorial que identifique as grandes rodovias para removê-las do *raster*. Utiliza-se um arquivo vetorial de rodovias do IBGE<sup>75</sup>, produzido a partir de uma adaptação da base de dados do Banco de Informações e Mapas de Transportes do Plano Nacional de Logística dos Transportes (BIT-PNLT) - Ministério dos Transportes. Os passos consistem em fazer a adequação do CRS do mapa de rodovias com os demais mapas utilizados, o que permite fazer a intersecção com o *vetor* que identifica a área de estudo. É utilizada uma geometria simplificada (Mapa 2.B-3).

---

<sup>75</sup> <https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/redes-geograficas/15793-logistica-dos-transportes.html>

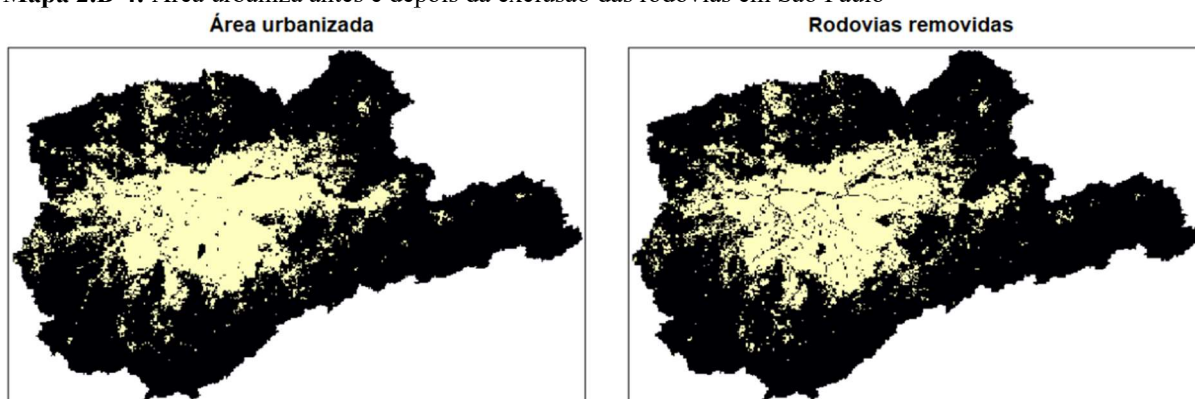
**Mapa 2.B-3:** Dados vetoriais das rodovias na concentração urbana do Rio de Janeiro



Fonte: Elaboração própria com base nos dados do IBGE

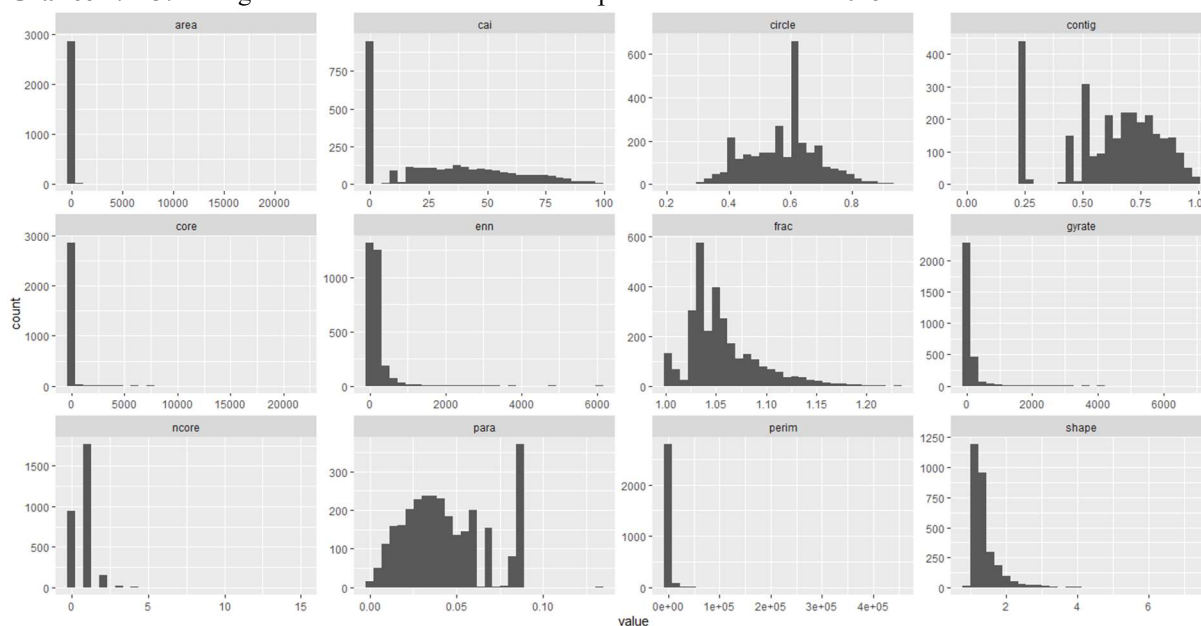
Para remover as rodovias do *raster*, um buffer para as rodovias é criado, utilizando uma largura especificada. Considerando as diretrizes do DNIT de que rodovias têm entre 30 e 80 metros de faixa de domínio (contado a partir do centro para cada um dos lados), utilizou-se um buffer com largura média de 50 metros, que foram então extraídos do *raster* em cada área de estudo individualmente.

Adicionalmente, pequenos erros nas operações de sobreposição podem ocorrer se os arquivos vetoriais não estiverem perfeitamente alinhados com os arquivos *raster*. Para evitar esse problema, foi feito um ajuste no processamento de imagens por meio do teste de elementos estruturantes com operações morfológicas (erosão, dilatação, fechamento e abertura). O resultado final utiliza os dados corrigidos utilizando o elemento de abertura. O Mapa 2.B-4 mostra um comparativo entre a área urbanizada antes e depois da exclusão das rodovias para o caso da concentração urbana de São Paulo.

**Mapa 2.B-4:** Área urbaniza antes e depois da exclusão das rodovias em São Paulo

Fonte: Elaboração própria

Por fim, as métricas calculadas no nível do fragmento evidenciam que há alguns fragmentos muito pequenos (*outliers*), o que é corroborado pelas distorções à esquerda das distribuições da área (*area*), índice de área central (*cai*) e inclinação à direita na razão perímetro-área (*para*), conforme ilustrado no Gráfico 2.A-3 para o caso de São Paulo. Uma combinação de limiares entre índices (área central igual a 0 ou área total inferior a 0,5 ha) foi então utilizada para remover algumas manchas de “erro” que podem distorcer os nossos índices urbanos.

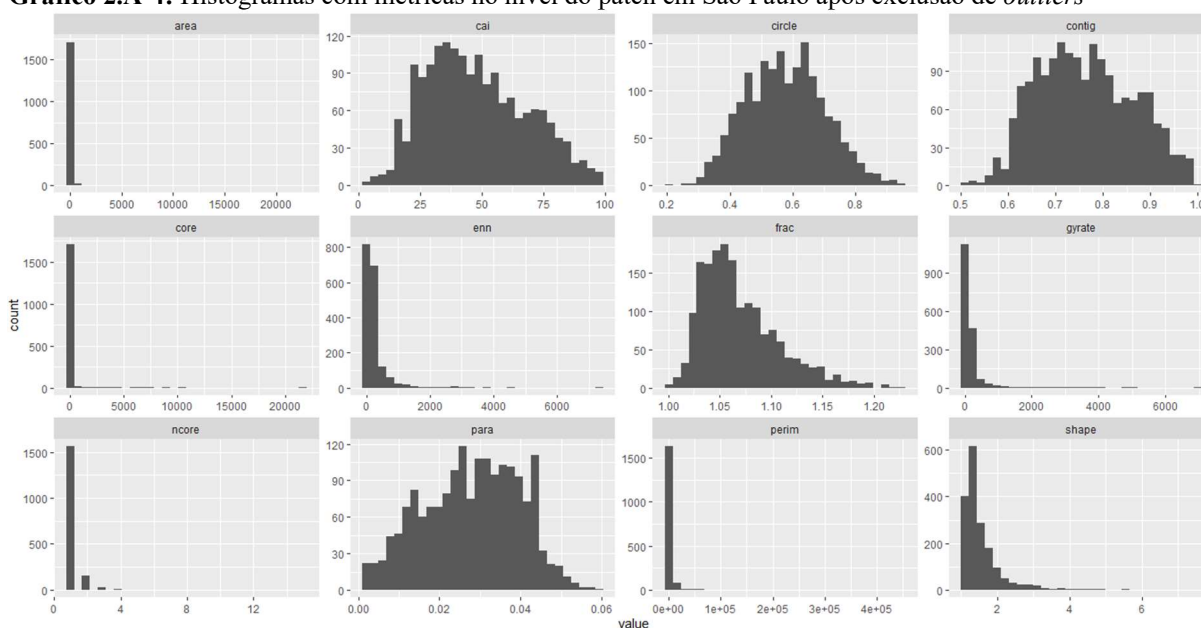
**Gráfico 2.A-3:** Histogramas com métricas no nível do patch em São Paulo - 2015

Fonte: Elaboração própria

Após a eliminação dessas distorções de fragmentos excessivamente pequenos, observa-se um considerável ajuste na distribuição das métricas no nível do fragmento, como ilustra o Gráfico 2.A-4 para São Paulo, com distribuições mais “bem comportadas” de diversas métricas, como “cai” e “para”.



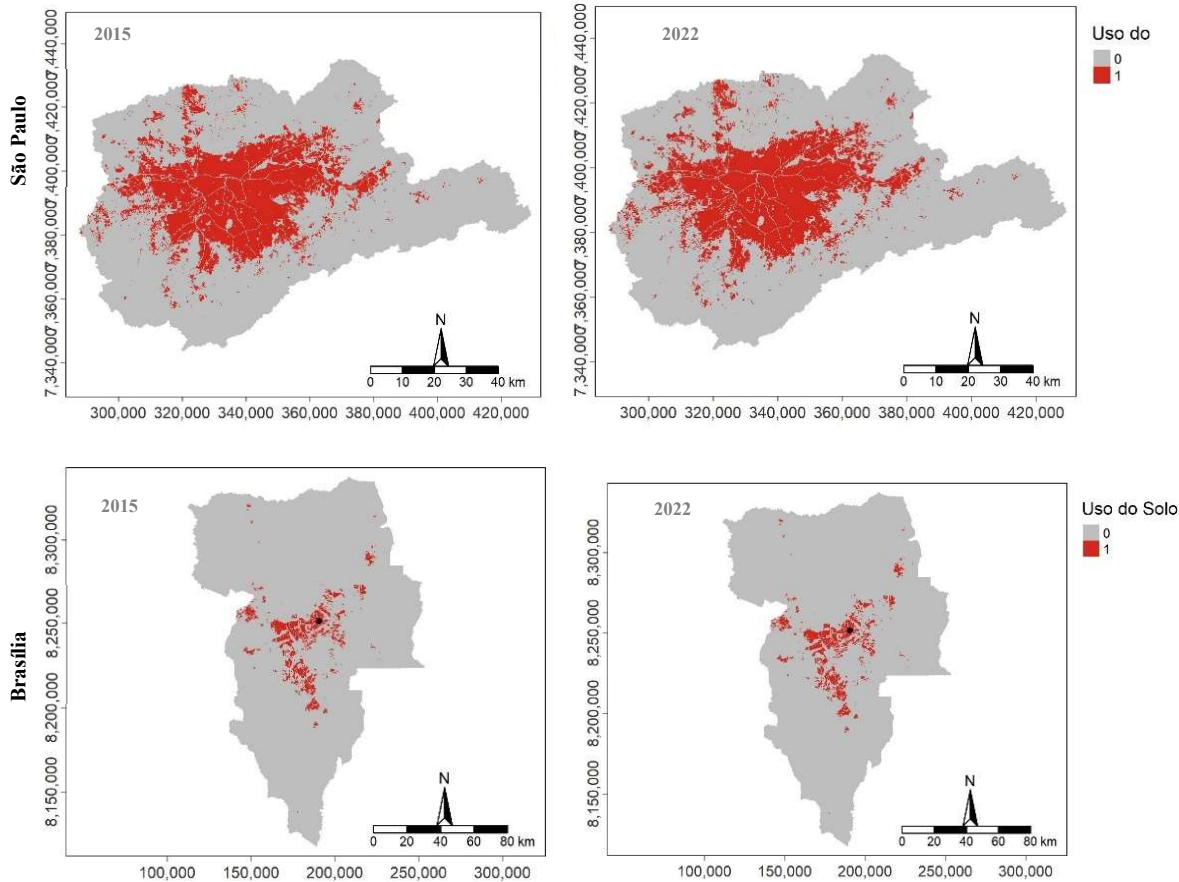
**Gráfico 2.A-4:** Histogramas com métricas no nível do patch em São Paulo após exclusão de *outliers*



Fonte: Elaboração própria

Os tratamentos descritos acima foram realizados para cada uma das áreas urbanas do estudo, que somaram 187 concentrações urbanas em cada ponto do tempo (1985, 1991, 2000, 2010, 2015 e 2022). O Mapa 2.B-5 traz as manchas urbanizadas para as concentrações e períodos selecionados. Como resultado, tem-se as bases de dados georreferenciadas preparadas para cálculo das métricas de paisagem e índices de configuração urbana derivados.

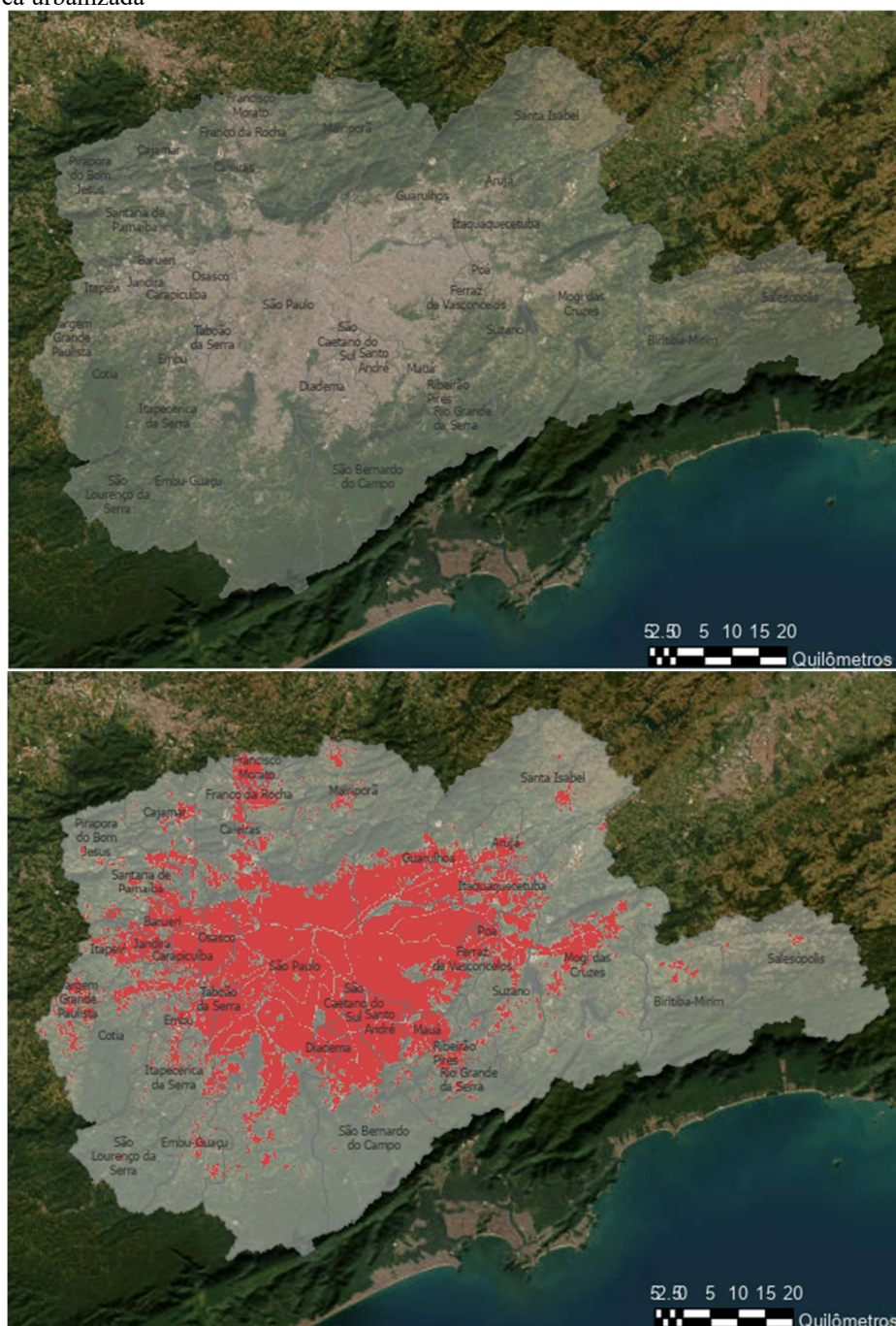
Mapa 2.B-5: Área urbanizada nas concentrações urbanas de São Paulo e Brasília\*



\*Legenda: 0 = não urbano/ 1 = urbano  
Fonte: Elaboração própria



**Mapa 2.B-6:** Comparativo entre imagem de satélite da concentração urbana de São Paulo e sobreposição com respectiva área urbanizada\*



Fonte: Elaboração própria com base em World\_Imagery<sup>76</sup> (ArcGIS PRO) e MapBiomias

<sup>76</sup> [https://services.arcgisonline.com/ArcGIS/rest/services/World\\_Imagery/MapServer](https://services.arcgisonline.com/ArcGIS/rest/services/World_Imagery/MapServer)

## APÊNDICE 2.C. Dados e Resultados Adicionais

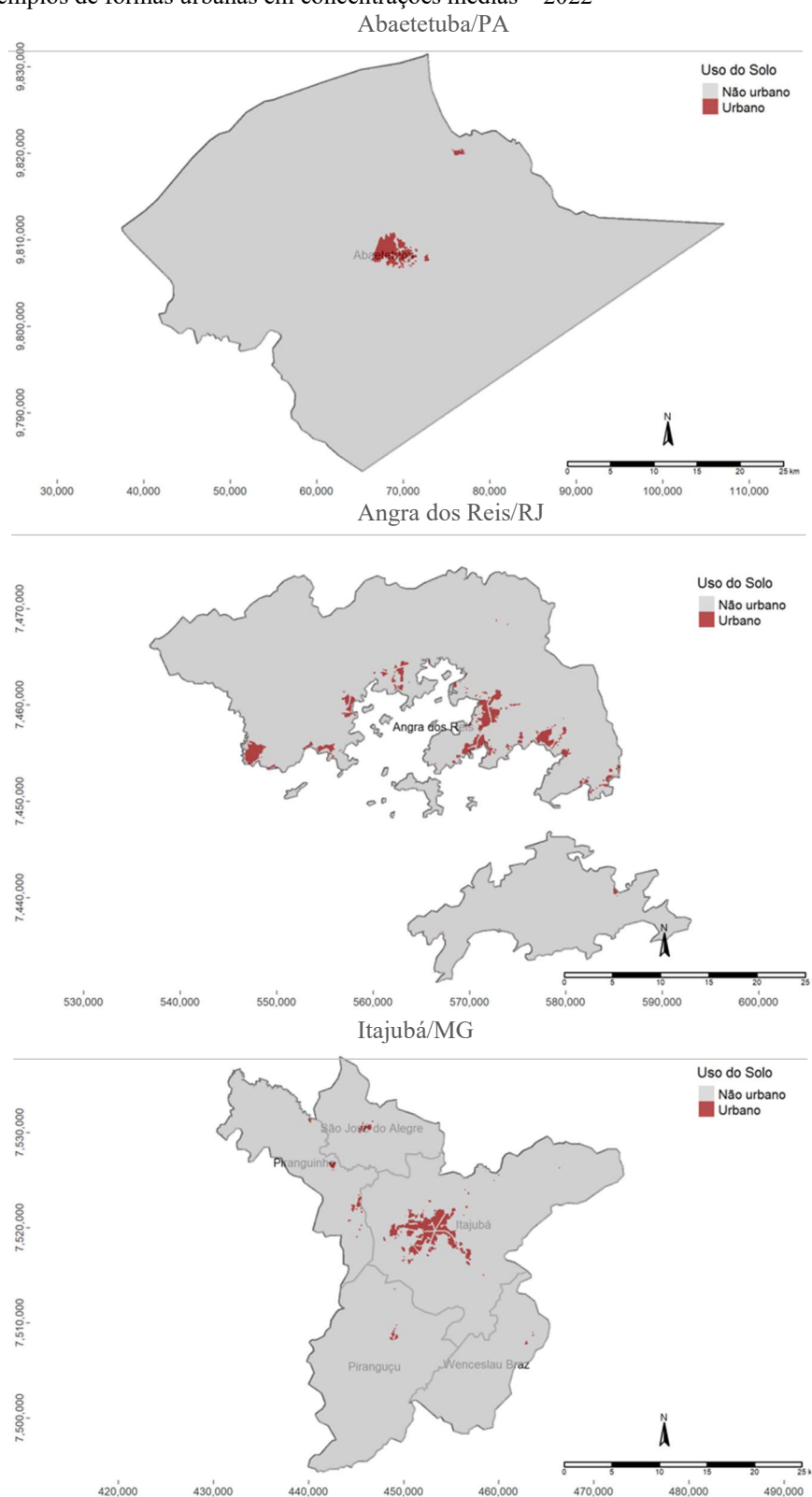
**Tabela 2.C-1:** Análise de correlação entre métricas espaciais por ano

| <b>1985</b> | CA        | N frag    | AWMSI     | AWMPFD    | CE    | CI |
|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|----|
| CA          | 1         |           |           |           |       |    |
| N frag      | 0,884***  | 1         |           |           |       |    |
| AWMSI       | -0,271*** | -0,420*** | 1         |           |       |    |
| AWMPFD      | -0,271*** | -0,410*** | 0,944***  | 1         |       |    |
| CE          | 0,290***  | 0,234**   | -0,076    | -0,181*   | 1     |    |
| CI          | -0,024    | 0,034     | -0,08     | -0,125    | 0,008 | 1  |
| <b>1991</b> | CA        | N frag    | AWMSI     | AWMPFD    | CE    | CI |
| CA          | 1         |           |           |           |       |    |
| N frag      | 0,878***  | 1         |           |           |       |    |
| AWMSI       | -0,316*** | -0,456*** | 1         |           |       |    |
| AWMPFD      | -0,329*** | -0,462*** | 0,929***  | 1         |       |    |
| CE          | 0,301***  | 0,236**   | -0,11     | -0,233**  | 1     |    |
| CI          | -0,023    | 0,034     | -0,125    | -0,097    | 0,05  | 1  |
| <b>2000</b> | CA        | N frag    | AWMSI     | AWMPFD    | CE    | CI |
| CA          | 1         |           |           |           |       |    |
| N frag      | 0,919***  | 1         |           |           |       |    |
| AWMSI       | -0,317*** | -0,454*** | 1         |           |       |    |
| AWMPFD      | -0,341*** | -0,472*** | 0,954***  | 1         |       |    |
| CE          | 0,307***  | 0,239***  | -0,065    | -0,188*   | 1     |    |
| CI          | 0,013     | 0,062     | -0,134    | -0,160*   | 0,009 | 1  |
| <b>2010</b> | CA        | N frag    | AWMSI     | AWMPFD    | CE    | CI |
| CA          | 1         |           |           |           |       |    |
| N frag      | 0,932***  | 1         |           |           |       |    |
| AWMSI       | -0,321*** | -0,456*** | 1         |           |       |    |
| AWMPFD      | -0,352*** | -0,482*** | 0,965***  | 1         |       |    |
| CE          | 0,302***  | 0,241***  | -0,107    | -0,214**  | 1     |    |
| CI          | -0,017    | 0,033     | -0,139    | -0,147*   | 0,038 | 1  |
| <b>2015</b> | CA        | N frag    | AWMSI     | AWMPFD    | CE    | CI |
| CA          | 1         |           |           |           |       |    |
| N frag      | 0,934***  | 1         |           |           |       |    |
| AWMSI       | -0,321*** | -0,456*** | 1         |           |       |    |
| AWMPFD      | -0,347*** | -0,474*** | 0,965***  | 1         |       |    |
| CE          | 0,298***  | 0,235**   | -0,085    | -0,178*   | 1     |    |
| CI          | 0,025     | 0,116     | -0,211**  | -0,231**  | 0,103 | 1  |
| <b>2022</b> | CA        | N frag    | AWMSI     | AWMPFD    | CE    | CI |
| CA          | 1         |           |           |           |       |    |
| N frag      | 0,934***  | 1         |           |           |       |    |
| AWMSI       | -0,318*** | -0,454*** | 1         |           |       |    |
| AWMPFD      | -0,345*** | -0,473*** | 0,965***  | 1         |       |    |
| CE          | 0,298***  | 0,237**   | -0,085    | -0,178*   | 1     |    |
| CI          | 0,08      | 0,203**   | -0,350*** | -0,380*** | 0,026 | 1  |

Notas:

CA: extensão urbana; N frag: Número de fragmentos; AWMSI: complexidade dos fragmentos; AWMPFD: complexidade dos limites urbanos; CE: centralidade; CI: compacidade.

Fonte: Elaboração própria

**Mapa 2.C-1:** Exemplos de formas urbanas em concentrações médias – 2022

*Notas:*

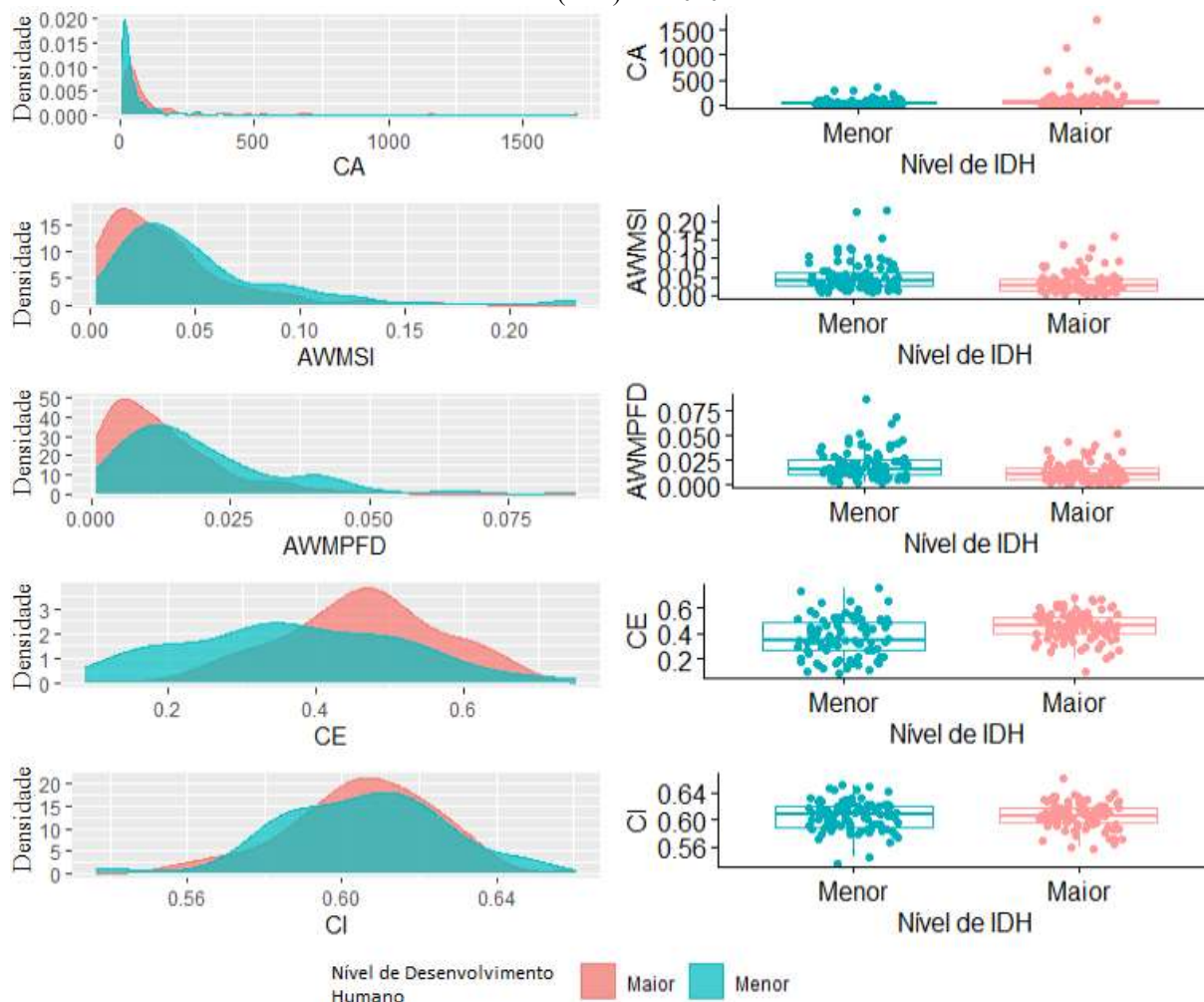
*Abaetetuba/PA: área urbanizada com elevado índice de complexidade dos fragmentos e dos limites urbanos;*

*Angra dos Reis/RJ: área urbanizada com baixo índice de centralidade.*

*Itajubá/MG: área urbanizada com elevado índice de compacidade.*

Fonte: Elaboração própria

**Gráfico 2.C-1:** Função densidade e dispersão Boxplot para métricas espaciais para concentrações urbanas com maior e menor índice de desenvolvimento humano (IDH) em 2010



Notas:

CA: extensão urbana; AWMSI: complexidade dos fragmentos; AWMPFD: complexidade dos limites urbanos; CE: centralidade; CI: compactidade.

Fonte: Elaboração própria

### **3. Impactos da configuração espacial urbana nas emissões de gases de efeito estufa: análise da densidade e dispersão nas concentrações urbanas brasileiras**

#### **3.1. Introdução**

Este trabalho tem como objetivo compreender a relação entre a forma urbana e a dinâmica das emissões de gases de efeito estufa (GEE) em grandes e médias concentrações urbanas brasileiras. Em particular, investigam-se os efeitos da densidade e da dispersão urbana, utilizando-se indicadores desenvolvidos a partir de informações de sensoriamento remoto aplicadas a métricas espaciais com o intuito de capturar aspectos relacionados à linearidade, compactação e fragmentação das áreas urbanas brasileiras. Os resultados obtidos oferecem subsídios importantes para a agenda de sustentabilidade urbana no Brasil, contribuindo para um planejamento mais integrado e eficaz.

Ao se considerar políticas públicas que visam favorecer o desenvolvimento urbano sustentável, é premente ressaltar a importância das forças de mercado na trama que faz emergir a forma das cidades, reconhecendo-se não só o alcance, mas também as possíveis limitações dos planejadores urbanos nesse processo. Bertaud (2004) alerta que, no longo prazo, são as forças de mercado que constroem as cidades, mas que essas forças respondem a restrições impostas por regulamentações e tributações e às oportunidades fornecidas pela infraestrutura básica construída pelo Estado. E também geram externalidades a serem tratadas por políticas públicas.

O padrão de uso da terra tem sido há muito estudado, a exemplo da análise de David Ricardo (1821) relacionando o preço da terra agrícola (aluguel) à sua fertilidade. Especificamente no que se refere à estrutura das cidades, os modelos de economia urbana remontam a Von Thünen (1966) e à introdução do conceito de que o aluguel aumenta com acessibilidade, o que resulta na ascensão de cidades monocêntricas. Alonso (1964), Mills (1967, 1972) e Muth (1969) aprimoram o modelo, estabelecendo explicações para a estrutura interna das cidades. Já Brueckner (1987) incorpora ao modelo o lado da produção de habitações, com insumos terra e capital. Como resultado do modelo<sup>77</sup>, padrões espaciais de densidade surgem

---

<sup>77</sup> Para discussões formais acerca de suas propriedades: Fujita(1989), Brueckner (1987), Glaeser (2008).

em virtude do diferencial de preços da terra e custos de transporte e da competição entre os habitantes por ofertas de renda aos proprietários<sup>78</sup> (Nadalin; Iglioni, 2015).

Se o processo de crescimento urbano é feito “para fora” em vez de “para cima”, tem-se o denominado crescimento espraiado ou *urban sprawl*. Esse fenômeno frequentemente está associado a emissões mais altas de poluentes, especialmente quando o crescimento ocorre de forma desordenada, com a conversão de terras rurais em áreas urbanas sem planejamento integrado, com fragmentação e dispersão das atividades urbanas e com grande dependência do automóvel.

O termo *urban sprawl* emergiu nos Estados Unidos, onde consolidou-se a partir da formação de subúrbios nas periferias das grandes cidades, destinados à classe média, e do incentivo ao uso de automóveis para aumentar a mobilidade urbana (Ewing, 1997; Brueckner, 2000; Galster *et al.*, 2001). Já no Brasil e na América Latina, esse processo ocorreu por meio da segregação de populações de baixa renda para áreas periféricas e pela construção de condomínios residenciais distantes dos centros urbanos, incluindo projetos como o Minha Casa Minha Vida, transformando as dinâmicas urbanas (Monte-Mor, 2006; Ojima, 2016; Hiromoto, 2018). Essas diferenças reforçam a necessidade de estudar os impactos das formas urbanas no contexto das emissões de gases de efeito estufa (GEE).

Embora o espraiamento possa ser uma consequência de forças de mercado, orientadas pelas preferências dos agentes econômicos, Brueckner (2000) aponta três falhas de mercado que também contribuem para o espraiamento indesejado, gerando externalidades negativas. A primeira falha ocorre devido aos custos sociais do congestionamento viário. O uso intensivo de automóveis, decorrente de decisões individuais, aumenta o trânsito e prolonga as viagens, contribuindo para maiores emissões de gases poluentes. A segunda envolve o valor social das terras abertas, que geralmente não é considerado pelos agentes privados. A expansão urbana, guiada pelo valor econômico das terras, ignora o valor ambiental e social de áreas naturais, como reservas florestais ou mananciais. Por fim, o financiamento da infraestrutura pública é uma terceira falha. Os custos da expansão para áreas de baixa densidade são frequentemente

---

<sup>78</sup> Como afirma Bertaud (2018), os mercados moldam as cidades por meio dos preços dos terrenos, tendo como mecanismo básico o fato de que uma alta demanda por locais específicos (trabalho e consumo) leva a diferenças nos preços dos terrenos, ocasionando altas concentrações de espaço físico (prédios altos) onde os preços dos terrenos são altos e vice-versa. Adicionalmente, o autor chama a atenção para o papel fundamental do preço do transporte - medido em tempo consumido e dinheiro gasto -, que tem grande influência no ritmo da expansão das cidades.

socializados, enquanto os benefícios permanecem privados, favorecendo escolhas individuais que impõem ônus coletivos.

Além disso, Turner (2007) identifica um problema de coordenação no planejamento de novas áreas urbanas. A falta de densidade suficiente pode inviabilizar bens públicos locais, como comércio e transporte público. Quando muitos optam por áreas de baixa densidade, os benefícios sociais associados à alta densidade, como transporte coletivo eficiente, deixam de ser alcançados. Essa dinâmica também afeta negativamente as áreas centrais das cidades, agravando sua desvalorização e degradando o patrimônio histórico, como argumentam Nadalin e Iglioni (2010).

Para enfrentar essas questões, a literatura destaca a importância das políticas públicas na promoção de formas urbanas sustentáveis. Investimentos em transporte público, zoneamento para uso misto do solo e incentivos à alta densidade urbana são essenciais para reduzir as emissões de GEE. Além disso, é necessário revisar políticas que incentivam o espraiamento, como subsídios ao transporte individual e habitação em áreas sem infraestrutura. Estudos comparativos sugerem que cidades que adotam políticas de incentivo ao transporte público e de uso misto do solo conseguem reduzir suas emissões de forma mais efetiva (Bertaud, 2004; Calthorpe, 2011).

Este artigo pretende compreender a relação entre forma urbana e as emissões de GEE e ressaltar possíveis propostas de políticas públicas urbanas que visam a mitigação dessas emissões. São avaliados, particularmente, os efeitos da densidade urbana e da dispersão espacial, mensurados com base em indicadores desenvolvidos nos artigos 1 e 2 desta tese. Para tanto, este artigo está organizado em 8 seções. Essa primeira introdutória é seguida da seção 2 com a revisão da literatura. Na seção 3, são apresentados os dados utilizados, enquanto a seção 4 apresenta a especificação do modelo empírico. Na seção 5 estão os resultados estimados, na seção 6 a discussão sobre os resultados e as limitações percebidas e na seção 7 as implicações para políticas públicas. Por fim, a seção 8 traz as principais conclusões.

### **3.2. As Emissões de Gases de Efeito Estufa e Forma Urbana**

Para compreender e mitigar as mudanças climáticas, diversos estudos empíricos têm investigado os fatores que impulsionam as emissões de gases de efeito estufa, com destaque para o carbono, dividindo-se, segundo Huang, Lu e Sellers. (2007), em três abordagens principais: (1) o modelo IPAT e suas extensões, (2) a teoria da Curva Ambiental de Kuznets (EKC) e (3) métodos de insumo-produto e decomposição.

O modelo IPAT, proposto por Holdren e Ehrlich (1974), relaciona o impacto ambiental a três fatores: população, nível de atividade econômica e progresso tecnológico. Apesar de sua relevância, o modelo assume proporcionalidade entre os fatores e não considera aspectos comportamentais. Para superar essas limitações, Dietz e Rosa (1997) desenvolveram o modelo STIRPAT, uma versão estocástica do IPAT que utiliza regressões para avaliar a influência de população, riqueza e tecnologia. Recentemente, o STIRPAT tem sido empregado para analisar os fatores que impulsionam mudanças nas emissões de carbono. York, Rosa e Dietz (2003) destacaram que o crescimento populacional e a afluência econômica são os principais responsáveis pelo aumento das emissões, enquanto o progresso tecnológico exerce um efeito mitigador, embora insuficiente para compensar os impactos negativos dos outros fatores. Estudos subsequentes, como os de Yang *et al.* (2018), Lin *et al.* (2017) e Polloni-Silva *et al.* (2021), reforçam a importância desses fatores, inclusive no contexto brasileiro.

A teoria da Curva Ambiental de Kuznets (EKC<sup>79</sup>), proposta por Grossman e Krueger (1995), descreve a relação entre desempenho ambiental e renda com o formato de “U invertido”<sup>80</sup>. Segundo esta visão, nos estágios iniciais de desenvolvimento econômico, a industrialização e urbanização demandariam grandes quantidades de recursos naturais. Portanto, durante esse período, o crescimento da renda seria acompanhado de um aumento da poluição (DASGUPTA *et al.*, 2002). No entanto, após atingir um certo nível de desenvolvimento, a relação se inverteria, e a degradação ambiental diminuiria devido a questões como maior eficiência tecnológica, regulamentações ambientais mais rigorosas, mudanças nos padrões de consumo. A literatura sobre EKC é vasta e controversa. Enquanto alguns artigos empíricos trazem evidências da relação de U invertido (Grossman; Krueger, 1995; Shafik; Bandyopadhyay, 1992; Selden; Song, 1994; Jänicke; Weidner, 1997), outros questionam a existência desta relação, seja por não encontrarem evidências empíricas robustas (Moomaw; Unruh (1997); Harbaugh *et al.* (2002)), por questionarem as metodologias aplicadas (Jha; Murthy, 2003; Stern *et al.* 1996) ou sugerirem outra relação, como o formato de “N”, indicando que a degradação ambiental pode aumentar novamente após altos níveis de renda (Pezzey, 1989; De Bruyn; Van Den Bergh; Opschoor, 1998). As críticas aos estudos que defendem a existência de uma EKC apontam como questionamentos que podem invalidar tal hipótese

---

<sup>79</sup> Environmental Kuznets Curve.

<sup>80</sup> Kuznets (1955) identificou uma relação semelhante em forma de "U invertido" entre desigualdade e crescimento econômico.



limitações metodológicas, desigualdades na distribuição dos impactos ou possibilidade de que padrões de consumo e exportação de poluição para países em desenvolvimento.

Já o método de insumo-produto (I-O) permite estimar emissões diretas e indiretas de setores industriais e da demanda final. Além do modelo I-O, a decomposição estrutural (SDA) e a decomposição por índice (IDA) são usadas para identificar as contribuições dos fatores que influenciam as emissões. Esses métodos são utilizados para análises nacionais e setoriais, como demonstrado nos estudos de Minx *et al.* (2009)). O IDA é utilizado para decompor mudanças em variáveis agregadas, como emissões de CO<sub>2</sub>, em fatores contribuintes, como população, intensidade de carbono e intensidade energética. Liu, Li e Ding (2021) utilizam o método IDA para investigar o impacto do tamanho da população urbana nas emissões de CO<sub>2</sub> usando dados de 175 cidades na China pela primeira vez. Alguns estudiosos alertam, no entanto, que a abordagem I-O e a análise de decomposição são baseadas em equações contábeis, não sendo adequadas para testar hipóteses empíricas (York, 2003).

Dentre essas metodologias, o modelo STIRPAT destaca-se por sua flexibilidade em analisar empiricamente os fatores que impulsionam as emissões de GEE. Isto porque permite a inclusão de novos fatores além de população, renda e tecnologia, em um desdobramento do modelo denominado STIRPAT modificado. Por isso, esta abordagem será utilizada para construir o modelo empírico no presente trabalho. Como o objetivo principal desta análise é investigar o efeito da forma urbana nas emissões de gases de efeito estufa, abaixo será dado foco na literatura que aborda o papel da forma urbana sobre as emissões de GEE.

### 3.2.1. O Impacto da Forma Urbana nas Emissões

A relação entre as emissões de GEE e a forma urbana tem sido cada vez mais discutida na literatura acadêmica, refletindo uma crescente preocupação com a sustentabilidade ambiental nas cidades. Estudos empíricos sobre esse tema podem ser classificados a partir do escopo da investigação e dos dados disponíveis, e vão daqueles que focam em padrões mais amplos e analisam fatores em escala nacional ou regional aos que adotam uma análise mais detalhada em nível urbano ou distrital<sup>81</sup>.

Estudos com uma abordagem mais ampliada focam especialmente em compreender padrões amplos de urbanização e seu impacto nas emissões de GEE, muitas vezes utilizando grandes bases de dados que cobrem regiões ou países para identificar tendências gerais e fatores

---

<sup>81</sup> Há diversos outros estudos que analisam os impactos da forma urbana na poluição, porém com focos distintos do aqui apresentado, especialmente por se debruçarem sobre poluição local, como fumaça industrial (Wang *et al.*, 2022) e material microparticulado (Borck e Schrauth, 2021; Carrozzi e Roth, 2023).

determinantes de emissões. A literatura é dividida sobre o impacto do grau de urbanização nas emissões de GEE (ou CO<sub>2</sub>). Alguns estudos apontam que a urbanização teria impactos positivos significativos sobre as emissões (Jorgenson; Clark, 2011; Zhang; Lin, 2012; Li *et al.*, 2020 – para emissões residenciais; Cheng; Hu, 2023). Já outros autores encontram relação negativa, refletindo questões como a modernização tecnológica, que associa altas taxas de urbanização a tecnologias e instituições avançadas (Cheng *et al.*, 2022; Liu, Li; Ding, 2021 - para emissões per capita).

Efeitos contrastantes da urbanização sobre as emissões de CO<sub>2</sub> foram encontradas por Poumanyvong e Kaneko (2010), para os quais a urbanização está fortemente associada ao aumento das emissões de CO<sub>2</sub> nos países de baixa e média renda, uma vez que as áreas urbanas em crescimento geralmente adotam práticas de consumo intensivas em carbono. Já nos países de alta renda, embora as emissões absolutas sejam maiores, o impacto da urbanização nas emissões per capita é reduzido devido a fatores como maior eficiência energética e políticas ambientais mais avançadas. A relação entre urbanização e emissões de carbono em uma escala global foi analisada por Jorgenson *et al.* (2010), sugerindo que a urbanização está entre os principais motores das emissões de carbono, mas o impacto varia consideravelmente dependendo do contexto econômico e estrutural de cada país.

Em espectro oposto aos estudos com enfoque mais amplo estão os estudos que exploram localidades específicas, como distritos (Borek; Schrauth, 2021) e decisões individuais e local/decisões individuais (Lee; Lee, 2014, 2020). Em geral, tais estudos enfatizam que o desenho das cidades, incluindo a acessibilidade ao transporte público e a infraestrutura para veículos não motorizados, tem um impacto substancial nas emissões de GEE. Por exemplo, em artigo que examina como a forma das cidades influencia o uso de automóveis e as emissões nas áreas metropolitanas da França, Blandin de Thé, Carantino e Lafourcade (2021) utilizam dados individuais para diferenciar os impactos da geometria urbana e da seleção espacial das famílias, concluindo que cidades com *layouts* espaciais mais compactos, fractais e diversificados apresentam menores emissões de veículos por domicílio. Além disso, verificam que cidades menores compensam a falta de densidade ou diversidade com um design geométrico mais sustentável, enquanto cidades de tamanho médio tendem a ter uma maior “pegada ecológica” ligada ao ato de dirigir automóveis que usam combustíveis fósseis.

Uma gama de estudos situa-se entre esses dois extremos, utilizando as informações de um conjunto de cidades e considerando tanto aspectos mais gerais quanto aspectos específicos das cidades para compreender os impactos das cidades sobre as emissões de poluentes. Há

diversos estudos na literatura sobre os impactos da forma urbana nas emissões de GEE que exploram a relação entre padrões de desenvolvimento urbano e as emissões associadas ao transporte, ao uso de energia em edifícios e à infraestrutura. Com frequência, as emissões tendem a ser associadas ao fenômeno denominado espraiamento urbano (*urban sprawl*).

Com relação às definições utilizadas para caracterizar o termo *urban sprawl*, Anas, Arnott e Small (1998) associam-no ao crescimento urbano com espaços não utilizados no interior (*leapfrogging*), enquanto Glaeser e Kahn (2004) o caracterizam pela descentralização e densidade. Já Galster *et al.* (2001) propõem oito dimensões para medir o fenômeno: densidade, continuidade, concentração, aglomeração, centralidade, nuclearidade, uso misto e proximidade, todas interrelacionadas. No contexto brasileiro, autores como Nadalin e Iglioni (2010) definem o espraiamento urbano como o crescimento urbano desconcentrado, não denso e que deixa vazios urbanos dentro da mancha urbana, associando as definições de Glaeser e Kahn (2004) com o entendimento de Anas, Arnott e Small (1998). Neste trabalho, uma abordagem semelhante será utilizada, mas com adaptações. Em linha com Glaeser e Kahn (2004), os dois aspectos a serem abordados serão densidade e descentralização. Porém para mensurar a descentralização, será proposto um indicador que busca retratar a configuração urbana no que diz respeito a três aspectos espaciais fundamentais, a saber, centralidade, compactação e fragmentação das manchas urbanas<sup>82</sup> (Galster *et al.*, 2001; Huang; Lu; Sellers., 2007).

Nos trabalhos empíricos que investigam os impactos do espraiamento, ou de maneira mais ampla, da forma urbana sobre as emissões, a densidade sobressai-se como uma variável central. A densidade pode ser avaliada em relação a subdivisões dentro da cidade, como na comparação entre a área central e as regiões mais distantes. Também pode ser mensurada de forma abrangente, considerando a cidade como um todo e comparando diferentes cidades entre si. Além disso, é possível analisar a evolução da densidade média ao longo do tempo (Nadalin; Iglioni, 2010). Há diferenças também entre as definições das áreas consideradas – desde os limites político-administrativos até áreas exclusivamente urbanas mensuradas por meio de diversas metodologias (classificação de setores censitários, sensoriamento remoto, luzes noturnas).

Em geral, estudos mostram que áreas urbanas com alta densidade tendem a ter menores emissões, especialmente em termos per capita, pois favorecem o uso de transporte público e a redução da dependência de veículos individuais, com economias de escala no transporte e maior

---

<sup>82</sup> Huang, Lu e Sellers. (2007) acrescenta também a porosidade, aspecto não explorado no presente trabalho devido a limitações nos dados.

eficiência no uso de energia (Ewing; Cervero, 2010; Hankey; Marshall, 2010; Glaeser; Kahn, 2010; Lee; Lee, 2014, 2020; Gudipudi *et al.*, 2016; Su, 2017; Li; Deng; Peng, 2020; Castells-Quintana; Dienesch; Krause, 2021; Yi *et al.*, 2021; Guo *et al.*, 2022). Poucas evidências no sentido oposto são encontradas, a exemplo de Li, Deng e Peng (2020), segundo os quais maior densidade está associada a maiores emissões residenciais.

Complementarmente, a análise da forma espacial urbana vem tornando-se um campo importante para a pesquisa em geografia urbana e economia (Chen *et al.*, 2020; Xiong; Duan, 2020) e trabalhos recentes têm incorporado métricas espaciais para capturar de maneira mais precisa os padrões morfológicos e funcionais desse processo e revelar sua complexidade e heterogeneidade em diferentes contextos regionais (Angel *et al.*, 2011; Schwarz, 2010). O trabalho de Seto e Fragkias (2005) pode ser considerado seminal no contexto de investigação da forma espacial das cidades, especialmente por sua contribuição ao entendimento das dinâmicas de urbanização e os padrões espaciais nas áreas urbanas.

As métricas de paisagem, originárias da ecologia da paisagem, ajudam a analisar aspectos como a compactação, fragmentação, centralidade e conectividade dos usos do solo em áreas urbanas, permitindo uma visão mais detalhada dos padrões de desenvolvimento e suas consequências para as emissões. As métricas disponíveis são diversas, a exemplo do extenso mapeamento realizado em Kheirkhah e Mehr (2021)<sup>83</sup>. Abaixo serão explorados trabalhos que utilizam indicadores semelhantes aos que compõem a definição de descentralização espacial no contexto do presente trabalho.

Chen *et al.* (2021) investigam os efeitos da centralidade, agregação e complexidade sobre a eficiência energética e as emissões de carbono em cidades chinesas. Os resultados indicam que a relação não é linear. Para a maioria das cidades, o aumento da centralidade melhora a eficiência energética, mas com uma taxa de melhoria decrescente. A complexidade urbana tem um efeito em U, com a maioria das cidades mostrando que maior complexidade reduz a eficiência. A aglomeração urbana impacta positivamente a eficiência energética apenas nas cidades mais eficientes. Os efeitos da centralidade e aglomeração seriam mais fortes em megacidades com mais de 5 milhões de habitantes, enquanto a complexidade afeta negativamente as cidades menores.

Estudos indicam que áreas urbanas mais compactas geralmente apresentam menor consumo de energia per capita devido à redução das distâncias percorridas e à maior eficiência

---

<sup>83</sup> Maiores detalhes são explorados no artigo anterior que compõe esta tese.

dos transportes públicos (Castells-Quintana; Dienesch; Krause, 2021 - para cidades relativamente pequenas; de The *et al.*, 2021; Gonzalez, 2005).

Já o impacto do grau de centralidade sobre as emissões de GEE depende das condições locais. Em cidades com um planejamento adequado, com redes de transporte público integradas e políticas de incentivo à mobilidade sustentável, o efeito tende a ser negativo, ou seja, maior centralidade associada a menores emissões (Lee; Lee, 2014; Seto *et al.*, 2014; Newman; Kenworthy, 1999). Tais estudos sugerem que cidades mais centralizadas tendem a ter menor dependência de veículos particulares devido à proximidade entre locais de trabalho, residência e serviços, bem como à maior facilidade na implementação e uso de transporte público ou modos ativos, como caminhar e pedalar. Por outro lado, em algumas cidades, a centralização pode estar associada a maiores emissões de GEE. Isso ocorre em casos onde há alta concentração de atividades econômicas intensivas em energia, como indústrias, ou quando o transporte público não é suficientemente eficiente para atender à demanda, forçando o uso de veículos motorizados individuais (Bai *et al.*, 2012; Marshall, 2008). Ademais, a superlotação de áreas centrais pode levar a congestionamentos e ao aumento das emissões devido à maior frequência de veículos em trânsito (Hickman *et al.*, 2017).

Com relação à fragmentação urbana, uma forma de mensuração baseada nas métricas de paisagem refere-se àquela que mede a divisão de áreas urbanas em pequenos blocos (fragmentos) contíguos. Os índices de complexidade da paisagem, como o AWMPFD<sup>84</sup> (que mede a complexidade dos limites urbanos) e o AWMSI<sup>85</sup> (mede a complexidade dos fragmentos no interior das manchas urbanas), têm sido cada vez mais utilizados na literatura.

Estudos que utilizam o AWMPFD mostram que áreas urbanas com fronteiras mais complexas tendem a ter padrões de uso do solo mais fragmentados na franja urbana, o que pode levar a um aumento nas emissões de GEE. Isso ocorre porque a complexidade dos limites urbanos frequentemente está associada à baixa densidade, incentivando o uso de veículos motorizados devido à falta de infraestrutura de transporte público e à maior dependência do automóvel (Liu; Fan; Xue, 2024; Su *et al.*, 2012). Esse padrão fomenta a expansão suburbana, aumentando o consumo de energia e as emissões de carbono. Dessa forma, a complexidade das fronteiras urbanas está associada a modelos de desenvolvimento dispersos, que são mais intensivos em emissões.

---

<sup>84</sup> *Area-Weighted Mean Patch Fractal Dimension*

<sup>85</sup> *Area-Weighted Mean Shape Index*

Já o efeito esperado para o AWMSI é ambíguo e depende do contexto específico da cidade. Altos valores podem indicar formas irregulares e fragmentação excessiva, promovendo maiores distâncias entre diferentes usos do solo, dificultando a conectividade e o acesso a modos de transporte sustentável e aumentando a dependência do carro (Wu *et al.*, 2002). Entretanto, também podem estar associados à presença de áreas verdes planejadas, que fragmentam o espaço urbano de forma controlada, melhorando a qualidade ambiental e incentivando atividades locais<sup>86</sup> e a “caminhabilidade” (Gill *et al.*, 2007; Alberti, 2005). Os efeitos adversos da fragmentação também podem ser reduzidos por meio da integração de áreas verdes com infraestrutura de transporte sustentável, como ciclovias, pontes e passarelas. Além disso, é preciso atenção também ao fato de que a fragmentação pode refletir ocupações informais, como favelas, frequentemente associadas a menores níveis de emissões, porém devido a um contexto socioeconômico não desejável e sim a ser combatido.

### 3.3. Dados

A revisão da literatura revela que, apesar das diferentes escalas de análise e abordagens metodológicas, muitos estudos apontam que a forma urbana pode ser um fator chave na determinação das emissões de GEE. A integração de modelos como o *STIRPAT* modificado, que leva em consideração variáveis específicas do ambiente urbano, tem se mostrado uma ferramenta útil para a análise da relação entre as características das cidades e suas emissões, permitindo que os formuladores de políticas urbanas desenvolvam estratégias mais eficazes para mitigar os impactos ambientais das áreas urbanas (Castells-Quintana; Dienesch; Krause, 2021; Zhu; Peng, 2012). Tais especificações estão fundamentadas na literatura existente (Cheng; Hu, 2023; dentre outros), bem como adaptadas para as áreas urbanas e os dados disponíveis. Um desafio importante ao realizar uma análise em nível de áreas urbanas (cidades ou aglomerações) é a obtenção de dados representativos de cada variável em âmbito subnacional (Sarzynski, 2012), fator que justificará algumas das escolhas metodológicas aqui apresentadas.

Neste trabalho, parte-se das informações georreferenciadas, que permitem o mapeamento do uso do solo ao longo de todo o território brasileiro. As informações são então agregadas tomando-se como unidade de análise as áreas urbanas. Na literatura, há diversas metodologias para delimitar as áreas urbanas, tais como a consideração do nível de contiguidade das manchas

---

<sup>86</sup> Áreas verdes próximas a residências e locais de trabalho incentivam a redução das emissões indiretas de GEE, promovendo atividades recreativas locais e diminuindo a necessidade de transporte para lazer e recreação em áreas mais afastadas (Haaland e van den Bosch, 2015).

urbanas, a interação econômica para residentes e/ou trabalhadores ou mesmo a definição de raios de tamanhos variados em relação a um centro de referência. Aqui, optou-se por utilizar o grau de interdependência espacial, social e econômica como referência para o entendimento do que define uma área urbana. Para isso, utilizou-se o conceito de arranjos populacionais, definidos pelo IBGE como agrupamentos de municípios com forte integração devido à contiguidade urbana ou deslocamentos frequentes para trabalho e estudo. A fim de considerar não só as áreas urbanas formadas por mais de um município em arranjo, expande-se o conceito para considerar como unidade de análise as concentrações urbanas, que incluem tanto os arranjos populacionais quanto os municípios isolados com mais de 100 mil habitantes.

As concentrações urbanas são classificadas em dois tipos: concentrações médias (de 100 a 300 mil habitantes) ou grandes (com mais de 300 mil habitantes) e adequadas para definir manchas urbanas, pois refletem não só áreas integradas, mas também com ampla disponibilidade de dados econômicos, além de permitir a adoção de fronteiras estáveis para análise. Como o ponto essencial deste estudo é o comportamento das métricas de padrão de paisagem ao longo do tempo e entre cidades, a adoção de uma análise comparativa interurbana e temporal que mantém a resolução do pixel e o zoneamento constantes ao longo do período de estudo minimiza os eventuais problemas relacionados às discussões sobre unidade de área modificável (Seto; Fragkias, 2005). A figura abaixo ilustra o recorte referente à concentração urbana de São Paulo. Tal concentração é formada por 37 municípios<sup>87</sup> e sua delimitação é dada pela fronteira correspondente à união dos limites políticos-administrativos a ela pertencentes (área em cinza). Já a área urbana está representada pela área em verde e corresponde ao solo identificado como de uso urbano pelo MapBiomias dentro desta delimitação (Mapa 3-1).

---

<sup>87</sup> São Paulo, Guarulhos, São Bernardo do Campo, Santo André, Osasco, Mauá, Mogi das Cruzes, Diadema, Carapicuíba, Itaquaquecetuba, Suzano, Taboão da Serra, Barueri, Embu, Cotia, Itapevi, Ferraz de Vasconcelos, Francisco Morato, Itapeçerica da Serra, São Caetano do Sul, Franco da Rocha, Ribeirão Pires, Santana de Parnaíba, Jandira, Poá, Caieiras, Mairiporã, Arujá, Cajamar, Embu-Guaçu, Santa Isabel, Rio Grande da Serra, Vargem Grande Paulista, Biritiba-Mirim, Pirapora do Bom Jesus, Salesópolis, São Lourenço da Serra (IBGE, 2015).

**Mapa 3-1:** Concentração urbana de Belém/PA com limites administrativos municipais e área urbanizada correspondente



Fonte: Elaboração própria com base em Mapbiomas e IBGE

As informações sobre emissões de GEE foram obtidos da base de dados do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG), uma iniciativa do Observatório do Clima. Este sistema fornece estimativas anuais de emissões de GEE no Brasil, baseando-se nas diretrizes do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) e na metodologia dos Inventários Brasileiros de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa, elaborada pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI). Os dados originais do SEEG são provenientes de relatórios governamentais, institutos de pesquisa, entidades setoriais e organizações não governamentais. A versão municipal utilizada refere-se à Coleção 11, publicada em fevereiro de 2024, que apresenta séries históricas das emissões de 1990 a 2022 para gases como CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O e HFCs, expressas em carbono equivalente (CO<sub>2</sub>e (t)) segundo o potencial de aquecimento global (GWP) com base no 5º relatório do IPCC (AR5).

O SEEG categoriza as emissões em cinco setores: Agropecuária, Energia, Mudanças de Uso da Terra, Processos Industriais e Resíduos. Este estudo considera as emissões dos três setores mais diretamente ligados às áreas urbanas – energia, processos industriais e resíduos – que formam a variável *gee\_urb*. Desde 2021, as estimativas de emissões por município, publicadas pelo SEEG, são feitas predominantemente por meio da distribuição das emissões



estaduais entre os municípios<sup>88</sup>. A partir da base de dados municipal disponibilizada pelo SEEG, foram feitas as agregações por concentração urbana somando-se as informações dos municípios correspondentes.

As variáveis de interesse que representam os aspectos urbanos a serem estudados incluem a taxa de urbanização, a densidade populacional e um índice de dispersão que sintetiza aspectos relacionados à centralidade, compacidade e fragmentação das manchas urbanas. Esta seção traz uma breve descrição de cada variável, enquanto o Quadro 3.A-1 traz a descrição detalhada e as fórmulas utilizadas para computar cada dimensão da configuração urbana<sup>89</sup>.

Para mensurar a densidade populacional no presente trabalho, duas *proxies* serão submetidas a teste. A primeira é a densidade demográfica (*dens\_demog*) medida pela razão entre a população total e a soma das áreas correspondentes aos limites administrativos dos municípios que compõem a concentração urbana. A segunda é densidade urbana (*dens\_urb*), uma medida de densidade que tenta aproximar as informações para o que de fato representa o componente urbano. Para tanto, excluem-se as respectivas áreas rurais de cada município, por meio da utilização de dados de sensoriamento remoto, bem como a população residente em setores censitários classificados como rurais. Assim, *dens\_urb* considera a razão entre a população urbana, definida como a população residente em setores censitários classificados como urbanos (IBGE), e a área da mancha urbana correspondente em cada concentração, segundo classificação de uso do solo realizada pelo MapBiomas.

Para capturar os efeitos relacionados ao processo de descentralização espacial, será calculado um índice de dispersão (representado pela variável *dispersao*). Tal índice é composto por indicadores que trazem informações sobre a configuração espacial das áreas urbanas: compactação (ou compacidade), centralidade e fragmentação, a qual subdivide-se em dois indicadores – complexidade no interior da mancha urbana e complexidade dos limites urbanos. A fim de realizar a composição do indicador de dispersão, os índices de centralidade e compacidade foram transformados no que se pode denominar índices de “linearidade” e de “esparsamento/difusão”, respectivamente. Desse modo, todos os indicadores que compõem o índice de dispersão podem ser interpretados na mesma direção, qual seja, um valor mais alto corresponde a uma maior dispersão em cada dimensão. Assim, quanto maior o indicador de

---

<sup>88</sup> Estima-se que mais de 90% das emissões nacionais foram alocadas nos municípios brasileiros, embora haja desafios, especialmente relacionados às emissões dos processos industriais, devido à dificuldade de obtenção de dados de atividade no nível municipal.

<sup>89</sup> Os índices utilizados foram desenvolvidos pela autora em artigo anterior, em que são explorados de maneira mais aprofundada.

linearidade, mais alongada e menos circular é a forma da mancha urbana; quanto maior o indicador de esparsamento, menos compacta é a forma urbana; e quanto maiores os índices de complexidade (no interior ou nos limites urbanos), maior a fragmentação observada. Por fim, para compor o índice final de dispersão, foi feita a média aritmética<sup>90</sup> de cada indicador previamente normalizado para o intervalo entre 0 e 1.

A estratégia de calcular um índice que agregue os aspectos relacionados à dispersão urbana não é nova e pode ser encontrada, por exemplo, em Ojima (2007). O autor propõe um índice de dispersão que é composto pelas variáveis de densidade, fragmentação, linearidade e centralização, com metodologias distintas daquela adotada no presente trabalho, pois se baseiam preponderantemente nas identificações de áreas urbanas do Censo-IBGE. Além das diferenças em relação à metodologia de cálculo e fontes de informações utilizadas, optou-se aqui por tratar a densidade separadamente em relação aos demais índices. Apesar de serem todos aspectos ligados à forma urbana, pode-se entender que tratam de categorias distintas. A densidade está mais ligada à distribuição da população no espaço, capturando de certa forma um componente vertical da distribuição espacial. Já as informações de centralidade, compacidade e fragmentação que compõe o índice de dispersão refletem aspectos ligados à categoria que Kheirkhah e Mehr (2021) denominam de “configuração urbana”, que compreende aspectos espaciais propriamente ditos. Sob a perspectiva do *urban sprawl*, manter separadas as variáveis densidade e dispersão pode permitir analisar separadamente os dois aspectos que o caracterizam – densidade e descentralização (Glaeser; Kahn, 2004), entendendo também que a descentralização (ou dispersão) como a dimensão espacial que reflete a distribuição da mancha urbana tanto em termos de forma (se mais circular ou linear), quanto em termos de preenchimento (mais ou menos fragmentado), conforme enfatizam Anas, Arnott e Small (1998), Galster *et al.* (2001) e Huang, Lu e Sellers., 2007.

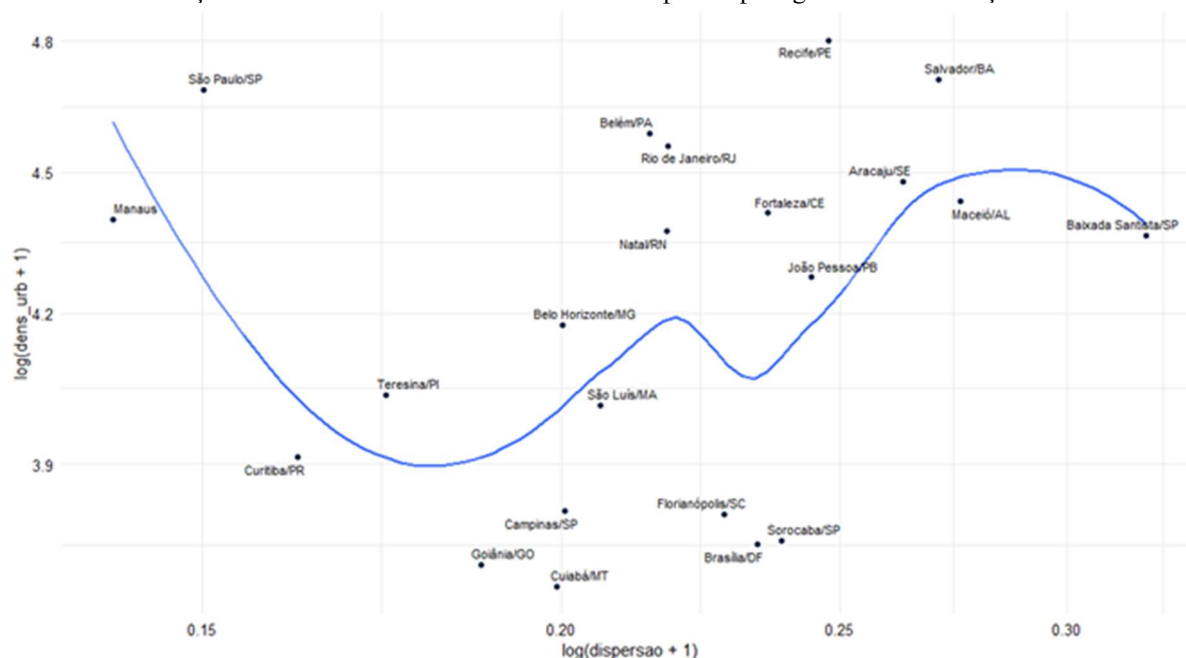
O Gráfico 3-1 apresenta a relação entre a densidade urbana e o índice de dispersão. Tanto a ilustração quanto a correlação entre as variáveis (Tabela 3.A-1) evidenciam que se tratam de fenômenos distintos da forma urbana. No caso ilustrado para grandes concentrações urbanas, observa-se um conjunto de concentrações urbanas com baixo índice de dispersão e baixa densidade (Curitiba, Teresina, Goiânia, Cuiabá e Campinas) e outro alta densidade e baixo índice de dispersão (São Paulo e Manaus). Há também aquelas com baixa densidade e valores

---

<sup>90</sup> O índice de dispersão é mensurado por meio da média aritmética simples entre os índices, uma vez que não haveria razões para atribuir um peso maior pra alguma das dimensões em relação ao que representa para a dispersão urbana.

maiores de dispersão (Sorocaba, Brasília, Florianópolis) e, por fim, aquelas com altos índices de densidade e dispersão, notadamente concentrações urbanas litorâneas como Salvador, Recife, Baixada Santista, Aracaju.

**Gráfico 3-1:** Relação entre densidade urbana e o índice de dispersão para grandes concentrações urbanas



Fonte: Elaboração própria

Por fim, a taxa de urbanização, representada pela variável *urb*, mede o percentual da população residente em setores censitários urbanos em relação à população total de cada concentração urbana, a partir da definição do Censo-IBGE.

### 3.3.1. Controles

O conjunto de variáveis de controle é composto pelas variáveis tradicionais do modelo STIRPAT: população, afluência/riqueza e tecnologia. A variável população total (representada por *pop\_tot\_censo*) de cada concentração urbana obtida por meio dos dados do Censo Demográfico do IBGE. Para afluência, utilizou-se o produto interno bruto (PIB) per capita (*pib\_pc*). Para o PIB, as séries históricas concatenadas<sup>91</sup> são do IPEADATA, de 1920 a 2010 e de 2002 a 2019, calculadas com base nos dados do IBGE (preços do ano 2010). No denominador de *pib\_pc*, considera-se a população total. A *proxy* para tecnologia é um desafio empírico importante. Embora alguns estudos utilizem a intensidade energética como medida de tecnologia (Poumanyong; Kaneko, 2010; Sadorsky, 2014; Cheng; Hu, 2023), esta não é uma

<sup>91</sup> As séries foram compatibilizadas de 1920 a 2001, concatenando-se as informações a partir da taxa de variação anual do PIB com metodologia 1920 a 2010. Foram realizadas estimativas para o PIB municipal de 1991, utilizando a tendência de crescimento do PIB dos municípios entre 1985-1996.

estratégia possível devido à falta de informações para as cidades brasileiras. Como alternativa, utiliza-se como *proxies* as proporções do valor de produção da indústria secundária (*pib\_ind\_part*) e do setor de serviços (*pib\_serv\_part*) em relação ao PIB. A indústria secundária, que abrange setores como manufatura e construção, é amplamente reconhecida por sua alta intensidade energética e significativa emissão de gases residuais. Estudos como os de Elfaki *et al.* (2014) destacam a relevância desses setores nas emissões de CO<sub>2</sub>. O contrário pode ser esperado quanto a uma maior participação do setor de serviços no PIB.

### 3.4. Especificação do modelo empírico

Conforme explorado anteriormente, a análise do impacto das atividades demográficas e econômicas no meio ambiente frequentemente é feita utilizando-se como estrutura o modelo *IPAT*, em que *I* representa o impacto ambiental, *P* a população, *A* corresponde à riqueza (afluência) e *T* à tecnologia. Entretanto, o modelo *IPAT* apresenta limitações, pois não permite a realização de testes de hipóteses e não acomoda mudanças não proporcionais induzidas por fatores humanos (Bai *et al.*, 2019; Shi, 2003). Para contornar essas restrições, Dietz e Rosa (1997) expandiram o *IPAT* e desenvolveram o modelo *STIRPAT*, com a seguinte formulação:

$$I_{it} = \alpha P_{it}^{c_p} A_{it}^{c_A} T_{it}^{c_T} e_{it} \quad (1)$$

em que  $\alpha$  representa o termo constante,  $c_p$ ,  $c_A$  e  $c_T$  representam os parâmetros indeterminados de *P*, *A* e *T*, respectivamente, e *e* representa o erro aleatório. Ao aplicarmos logaritmos naturais na Eq. (1), obtemos a especificação linear denominada na literatura de *STIRPAT*, a qual tem como vantagem permitir incorporar novas variáveis que influenciam o impacto ambiental. Por exemplo, Andreoni e Levinson (2001) incluíram o termo quadrático do produto per capita e Cheng, Li e Jun (2020) exploraram os efeitos do investimento estrangeiro direto na poluição. Diversos autores utilizam desdobramentos do *STIRPAT* para explorar questões urbanas. Martínez-Zarzoso e Maruotti (2011) acrescentaram a proporção da população urbana, enquanto Cheng e Hu (2023) incorporaram tanto nível de urbanização quanto nível de dispersão urbana. Yi *et al.* (2021) e Sarzynski (2012) acrescentam os impactos da variável densidade ao modelo, bem como os termos quadrático e cúbico do PIB per capita, dentre outras variáveis de controle. Já Castells-Quintana, Dienesich e Krause (2021) partem da especificação *STIRPAT* para analisar o papel da densidade e da estrutura urbana (grau de policentralidade) nas emissões de CO<sub>2</sub> e de PM<sub>2.5</sub>.

A fim de explorar as questões ligadas à urbanização, este trabalho segue a estratégia de desenvolver uma versão expandida do modelo *STIRPAT* para testar a relação entre a forma

urbana e as emissões de GEE. Além da variável relacionada à taxa de urbanização, são incorporadas também a densidade e as métricas espaciais ao modelo *STIRPAT*, resultando no modelo expandido apresentado a seguir:

$$\ln(I_{it}) = \ln(\alpha) + \mathbf{b}'_z \cdot \ln(\mathbf{Z}_{it}) + \mathbf{c}'_x \cdot \ln(\mathbf{X}_{it}) + e_{it} \quad (2)$$

onde  $I_{it}$  representa as emissões de GEE na área urbana  $i$  no ano  $t$ ,  $\mathbf{Z}_{it} = [Z_{1,it}, Z_{2,it}, \dots, Z_{j,it}]'$  é um vetor<sup>92</sup> das variáveis de interesse, que inclui as variáveis referentes às características urbanas, e  $\mathbf{X}_{it} = [X_{1,it}, X_{2,it}, \dots, X_{k,it}]'$  é um vetor das variáveis de controle.

Quanto à abrangência temporal, são utilizadas informações referentes aos anos de 1991, 2000 e 2010. Nas estimativas, foram considerados os efeitos fixos de cada concentração (mancha) urbana, para controlar características idiossincráticas invariantes no tempo, como localização geográfica<sup>93</sup>. Além disso, os coeficientes na especificação *log-log* fornecem as elasticidades. O modelo inclui termos quadráticos e cúbicos para o PIB per capita. Coeficientes significantes para esses termos indicam efeitos não lineares da riqueza nas emissões. Um coeficiente positivo e significativo para o PIB per capita combinado com um coeficiente negativo e significativo para o termo quadrático forneceriam evidências para a hipótese sugerida pela Curva Ambiental de Kuznets (EKC). Além disso, coeficientes positivos e significativos no termo cúbico apontam que a relação entre renda e poluição pode mudar nos níveis mais altos de riqueza, como defendem alguns críticos da modernização ecológica (Sarzynski, 2012).

#### 3.4.1. Estatísticas Descritivas e Tratamentos

Todas as variáveis utilizadas nas estimações e as respectivas estatísticas descritivas estão apresentadas na Tabela 3-1. A amostra selecionada é composta por informações de 155 concentrações urbanas em três períodos no tempo (1991, 2000 e 2010). Os dados de emissões de GEE foram obtidos do SEEG (Observatório do Clima). Informações sobre população, PIB e área dos limites administrativos são do IBGE e IPEA, enquanto a área urbana é do Mapbiomas. Já os indicadores urbanos (*densidade urbana* e *dispersao*) são de autoria própria. O número de concentrações urbanas pertencentes à amostra representa 84% do total de concentrações urbanas definidas pelo IBGE. Excluíram-se da análise as observações com dados

<sup>92</sup> Ou uma matriz coluna

<sup>93</sup> Efeitos fixos de tempo foram testados, porém não se mostraram significantes.

faltantes para qualquer ano<sup>94</sup>, bem como os valores extremos considerando-se como referência o nível de emissões urbanas de GEE per capita<sup>95</sup>.

Os dados emissões utilizados consideram a média móvel de 3 anos (*gee\_urb\_mm* e *gee\_urb\_pc\_mm*), centralizada no ano de referência do Censo Demográfico. A motivação principal dessa estratégia foi suavizar possíveis oscilações de curto prazo nas emissões, especialmente ligadas à dinâmica dos ciclos econômicos. Tratamento semelhante foi feito para o PIB. Com isso, está sendo utilizada a informação de emissões e PIB um ano à frente e um ano atrás ao ano de referência.

**Tabela 3-1:** Estatísticas descritivas<sup>1</sup>

| Variável             | Fórmula e Unidade                      | Média       | Desvio-padrão | Mínimo     | Máximo         |
|----------------------|----------------------------------------|-------------|---------------|------------|----------------|
| <i>gee_urb_mm</i>    | Ton de CO2e GWP-AR5                    | 527.702,380 | 1.989.417,830 | 8.053,310  | 26.562.514,370 |
| <i>gee_urb_pc_mm</i> | Ton de CO2e per capita                 | 0,830       | 0,920         | 0,120      | 4,680          |
| <i>urb</i>           | Percentual                             | 0,900       | 0,100         | 0,330      | 1,000          |
| <i>dens_demog</i>    | Pessoas por hectare                    | 2,260       | 3,090         | 0,020      | 27,440         |
| <i>dens_urb</i>      | Pessoas por hectare                    | 59,730      | 28,610        | 16,880     | 252,370        |
| <i>dispersao</i>     | Índice                                 | 0,310       | 0,080         | 0,140      | 0,660          |
| <i>pop_tot_censo</i> | Pessoas                                | 538.333,370 | 1.721.236,750 | 34.661,000 | 19.629.394,000 |
| <i>pib_pc</i>        | PIB (preços 2010) em R\$ mil percapita | 17,350      | 8,910         | 2,010      | 53,400         |
| <i>pib_serv_part</i> | Percentual                             | 0,610       | 0,130         | 0,170      | 0,900          |
| <i>pib_ind_part</i>  | Percentual                             | 0,320       | 0,140         | 0,020      | 0,820          |

<sup>1</sup> N = 465 (i=155, t=3).

Fonte: Elaboração própria

### 3.4.2. Testes de especificação

Na Tabela 3-2, são apresentados os testes de seleção do modelo. Começamos analisando a consistência dos modelos. Inicialmente, foi testado se os efeitos individuais deveriam ser agrupados (*pooled*) ou fixos. Entre os modelos agrupados e os efeitos fixos, o teste F apresenta evidências a favor dos efeitos fixos. O p-valor (2.2e-16) é muito baixo, levando à rejeição da hipótese nula com alto nível de confiança. Isso significa que as diferenças entre as unidades (no presente caso, as concentrações urbanas) têm impacto na variável dependente e, portanto, um modelo que considere esses efeitos (como o modelo de efeitos fixos ou aleatórios) é mais apropriado do que um modelo de Mínimos Quadrados Ordinários Agrupados (*Pooled OLS*). Os

<sup>94</sup> O painel foi balanceado utilizando como critério a manutenção de todos os períodos de tempo, mas apenas para as concentrações urbanas que possuem informações em cada um dos períodos. Foram removidas 19 concentrações devido à falta de informações.

<sup>95</sup> Foram considerados extremos (*outliers*) os níveis de emissões de GEE per capita do primeiro e último percentil (abaixo de 1% e acima de 99%). Esse tratamento levou à remoção de 11 concentrações da amostra. A exclusão de valores extremos ajuda a contornar eventuais erros de medida da variável emissões.

modelos de Efeitos Fixos também são a melhor abordagem em comparação com os efeitos aleatórios, conforme confirmado pelo teste de Hausman. O p-valor baixo ( $1,463 \times 10^{-13}$ ) indica que há evidências suficientes para rejeitar a hipótese nula de que o modelo de efeitos aleatórios (EA) seria consistente e, portanto, apropriado.

Para verificar a eficiência, foram realizados os testes de Breusch-Pagan e Breusch-Godfrey, os quais investigam erros heterocedásticos e autocorrelacionados, respectivamente. Os resultados indicam que os erros são heterocedásticos e autocorrelacionados. A matriz de covariância dos erros foi devidamente ajustada utilizando os estimadores *sandwich* de Arellano e Bond (1991) com erros-padrão agrupados, o que também pode evitar a provável correlação espacial.

**Tabela 3-2:** Testes para modelos em painel

| Teste           | Comparação                 | Estatística       | Conclusão                 |
|-----------------|----------------------------|-------------------|---------------------------|
| Teste F         | Pooled vs.                 | F = 3,8456        | Efeitos Fixos             |
|                 | Efeitos Fixos              | p-valor < 0,000   |                           |
| Hausman Test    | Efeitos Fixos vs.          | $\chi^2 = 69,257$ | Efeitos Fixos             |
|                 | Efeitos Aleatórios         | p-value < 0,000   |                           |
| Breusch-Pagan   | Homoscedastic vs.          | BP = 63,894       | Resíduos Heterocedásticos |
|                 | Heteroskedastic            | p-value < 0,000   |                           |
| Breusch-Godfrey | Correlação Serial          | $\chi^2 = 168,56$ | Correlação Serial         |
|                 | nos Erros Idiossincráticos | p-value < 0,000   |                           |

Fonte: Elaboração própria

### 3.5. Resultados estimados

Na Tabela 3-3 são apresentados os resultados das estimativas utilizando o logaritmo das emissões urbanas de GEE como variável dependente<sup>96</sup>, em um painel balanceado. No modelo 1, são apresentadas as estimações realizadas por meio do método de mínimos quadrados ordinários agrupados (POLS rob.) com erros-padrões robustos à autocorrelação serial e à heterocedasticidade. Os modelos (2) e (3) trazem a mesma especificação estimada por meio do método de painel com efeitos aleatórios (EA rob.) e fixos (EF rob.), respectivamente. Uma vez que os testes estatísticos apontam para a melhor adequação do painel com efeitos fixos, este será o modelo de referência analisado a seguir.

<sup>96</sup> Para reduzir efeitos pontuais resultantes da flutuação anual das emissões, considerou-se a média móvel de três anos, centralizada no ano de referência. Por exemplo, *gee\_urb\_mm* de 2010 refere-se à média das emissões urbanas de GEE em 2009, 2010 e 2011.

As estimativas apontam para a relevância dos aspectos urbanos para explicar os diferentes níveis de emissões de GEE nas concentrações urbanas brasileiras entre 1991 e 2010<sup>97</sup>. O coeficiente relacionado à densidade urbana ( $\log(dens\_urb+1)$ ) foi estimado em -0,737, ou seja, 1% a mais na densidade urbana reduz em 0,7% o nível de emissões urbanas de GEE. A elasticidade negativa das emissões de GEE em relação à densidade urbana está em linha com o esperado. Com relação ao índice de dispersão, o coeficiente estimado de 2,915 indica que 1% a mais no grau de dispersão urbana está associada a emissões urbanas de GEE 2,9% menores.

Com relação às variáveis de controle, observa-se coeficiente positivo e significativo tanto para a população (elasticidade estimada em 4,2%), quanto para o PIB per capita (1,8%). Já o coeficiente relacionado à participação do PIB industrial não se mostrou significativo.

**Tabela 3-3:** Resultados da regressão em painel para Emissões Urbanas de GEE

|                             | $\log(gee\_urb\_mm+1)$ |                       |                      |
|-----------------------------|------------------------|-----------------------|----------------------|
|                             | POLS rob. (1)          | EA rob. (2)           | EF rob. (3)          |
| $\log(dens\_urb + 1)$       | -0,641***<br>(0,084)   | -1,103***<br>(0,204)  | -0,737***<br>(0,224) |
| $\log(dispersao + 1)$       | 2,857***<br>(0,636)    | 4,069***<br>(1,407)   | 2,915*<br>(1,516)    |
| $\log(pop\_tot\_censo + 1)$ | 1,214***<br>(0,046)    | 2,932***<br>(0,195)   | 4,203***<br>(0,352)  |
| $\log(pib\_pc + 1)$         | 0,797***<br>(0,105)    | 2,075***<br>(0,189)   | 1,816***<br>(0,238)  |
| $pib\_ind\_part$            | -0,615<br>(0,411)      | 0,161<br>(0,635)      | 0,610<br>(0,673)     |
| Constante                   | -3,557***<br>(0,669)   | -26,978***<br>(2,593) |                      |
| Efeitos Individuais         | Não                    | Sim (EA)              | SIM (EF)             |
| Observações                 | 465 (i=155)            | 465 (i=155)           | 465 (i=155)          |
| R <sup>2</sup>              | 0,691                  | 0,714                 | 0,779                |
| R <sup>2</sup> Ajustado     | 0,687                  | 0,711                 | 0,664                |
| Estatística F               | 197,999***             | $\chi^2 = 826,539***$ | 137,109***           |

Notas: Níveis de significância: \* $p < 0,1$ ; \*\* $p < 0,05$ ; \*\*\* $p < 0,01$

Painel Balanceado; EF: Efeitos Fixos/ EA: Efeitos Aleatórios; Erros-padrão robusto entre parênteses

Fonte: Elaboração própria

### 3.4.3. Especificações Adicionais

A Tabela 3-4 apresenta os resultados das estimações levando-se em consideração as emissões per capita ( $gee\_urb\_pc\_mm$ ). Os resultados são qualitativamente semelhantes aos

<sup>97</sup> Note-se que a variável *urb* não foi incluída na especificação final para evitar potenciais problemas de multicolinearidade, uma vez que esta apresenta correlação relevante (matriz de correlação na Tabela 3.A-1 do apêndice) tanto com *pib\_pc* quanto com o índice de dispersão.



apresentados acima. As variáveis mantêm o grau de significância e os sinais observados. Em termos de magnitude, estima-se elasticidade de -0,26% da densidade urbana e de 1,4% do índice de dispersão, ambos em linha com o esperado. Deste modo, as estimativas para a elasticidade da densidade obtidas nos modelos (3) e (6) estão em linha com a literatura, a exemplo do encontrado por Lee e Lee (2014) entre -0,35 e -0,48, Gudipudi *et al.* (2016) entre -0,79 e -1,105 e Castells-Quintana, Dienesich e Krause (2021) entre -0,22 e -0,61.

**Tabela 3-4:** Resultados da regressão em painel para Emissões Urbanas de GEE per capita

|                         | <i>log(gee_urb_pc_mm+1)</i> |                        |                      |
|-------------------------|-----------------------------|------------------------|----------------------|
|                         | POLS rob. (4)               | EA rob. (5)            | EF rob. (6)          |
| log(dens_urb + 1)       | -0,279***<br>(0,035)        | -0,279***<br>(0,035)   | -0,262***<br>(0,097) |
| log(dispersao + 1)      | 1,322***<br>(0,271)         | 1,322***<br>(0,271)    | 1,414**<br>(0,660)   |
| log(pop_tot_censo + 1)  | 0,100***<br>(0,020)         | 0,100***<br>(0,020)    | 1,310***<br>(0,158)  |
| log(pib_pc + 1)         | 0,297***<br>(0,042)         | 0,297***<br>(0,042)    | 0,723***<br>(0,107)  |
| pib_ind_part            | -0,145<br>(0,166)           | -0,145<br>(0,166)      | 0,326<br>(0,329)     |
| Constante               | -0,736**<br>(0,293)         | -0,736**<br>(0,293)    |                      |
| Efeitos Individuais     | Não                         | Sim (EA)               | SIM (EF)             |
| Observações             | 465 (i=155)                 | 465 (i=155)            | 465 (i=155)          |
| R <sup>2</sup>          | 0,240                       | 0,240                  | 0,656                |
| R <sup>2</sup> Ajustado | 0,232                       | 0,232                  | 0,476                |
| Estatística F           | 49,363***                   | $\chi^2 = 246,814$ *** | 81,439***            |

Notas: Níveis de significância: \* $p < 0,1$ ; \*\* $p < 0,05$ ; \*\*\* $p < 0,01$

Painel Balanceado; EF: Efeitos Fixos/ EA: Efeitos Aleatórios; Erros-padrão robusto entre parênteses

Fonte: Elaboração própria

É importante notar que foi testada a substituição da variável *dens\_urb* pela variável *dens\_demog* (ver Tabela 3.A-2 do apêndice). Tal especificação, no entanto, aponta coeficiente positivo da densidade, ao contrário do esperado. O resultado pode ser atribuído tanto a erros de medida da variável – uma vez que inclui grandes áreas rurais não associadas ao contexto urbano – quanto à multicolinearidade, pois tal variável mostra elevada correlação com a variável *pop\_tot\_censo*. Adicionalmente, foi verificada também a possibilidade de se incluir cada métrica espacial separadamente (CE, CI, AWMSI e AWMPFD), substituindo-se o índice de dispersão. Os resultados mostram que os indicadores estatisticamente mais relevantes são CI e AWMPFD, mantendo-se também a relevância estatística e magnitude da densidade (ver Tabela 3.A-3 do apêndice).

Outras especificações testadas foram a inclusão dos termos quadráticos e cúbicos para *pib\_pc* e *dens\_urb*, bem como a substituição da variável *pib\_ind\_part* por *pib\_serv\_part*, porém nenhuma delas mostrou significância estatística. Foram testadas ainda interações da densidade urbana com outras características, como o tipo de concentração (média ou grande), para tentar capturar possíveis efeitos distintos a depender do tamanho da área urbana, porém o coeficiente não foi significativo. A interação das variáveis urbanas com *dummies* para grandes regiões geográficas também não se mostrou estatisticamente significativa.

Por fim, reconhece-se que a presença de favelas nas áreas urbanas poderia distorcer os resultados, uma vez que áreas com elevado grau de informalidade tendem a ser muito densas e emitir pouco, devido aos padrões de consumo. Devido à falta de disponibilidade de dados sobre população em favelas, foi possível mapear tal informação apenas para 2010, com base na investigação do Censo-IBGE (2010) a respeito dos aglomerados subnormais (favelas). Foi construída, então, uma *dummy* indicativa da presença de favelas na concentração urbana. Realizou-se a interação desta *dummy* com a variável densidade urbana para testar se há interferência das favelas no coeficiente estimado para densidade, porém não se observou significância estatística que corrobore tal efeito<sup>98</sup>.

### 3.6. Discussões e Limitações

Os resultados apresentados aqui confirmam que a poluição nas concentrações urbanas brasileiras provavelmente aumentará de forma expressiva com o crescimento populacional. Adicionalmente, o aumento da renda também deve ter impacto relevante sobre as emissões, em linha com o encontrado por Polloni-Silva *et al.* (2021). Conforme Perobelli *et al.* (2015), o consumo privado de bens constitui uma parcela significativa da demanda final, de modo que mesmo leves alterações nesse consumo podem resultar em impactos substancialmente maiores nas emissões. Assim, sob tal perspectiva do IPAT tradicional, a responsabilidade pela redução da poluição ficaria a cargo dos ganhos de eficiência do consumo e da produção, geralmente ligadas a melhorias tecnológicas. Porém, como sugere o paradoxo de Jevons, reduções no impacto ambiental podem ser difíceis de ocorrer apenas com melhorias tecnológicas, já que estas reduzem o custo de uso de energia, o que pode aumentar o consumo total e os impactos ambientais associados (Alcott, 2005).

---

<sup>98</sup> Os modelos citados neste parágrafo e no anterior não foram reportados por ocupar espaço excessivo, porém estão prontamente disponíveis por requisição.

A esse respeito, a análise aqui desenvolvida indica que uma estratégia importante para reduzir o impacto sobre as emissões urbanas de GEE relaciona-se ao tipo de desenvolvimento urbano experimentado. Em particular, o desenvolvimento urbano compacto, com elevados índices de densidade e baixa fragmentação na franja urbana podem conferir reduções nas emissões totais e *per capita*. Assim, se os formuladores de políticas aspiram melhorar os padrões de vida globalmente, também devem focar na redução da intensidade das emissões nas atividades econômicas dentro das cidades (Sarzynski, 2012). É importante, no entanto, que este esforço seja feito levando em consideração aspectos ligados a possíveis aumentos de exposição da população à poluição urbana, preservando-se, por exemplo, espaços abertos com áreas verdes no interior das cidades.

Alguns fatores que não foram incluídos nos modelos e que teriam potencial de melhorar sua especificação são a proporção da população que vive de favelas<sup>99</sup>; o índice de localização da população e do emprego dentro das áreas urbanas – por exemplo, índice de Moran para capturar aspectos como monocentralidade e policentralidade (não há conhecimento desses índices já desenvolvidos para as concentrações urbanas); considerações sobre o uso misto do solo (alvo de abordagem recente do Censo-IBGE, porém não disponível para análises de longo prazo). Adicionalmente, novas formas de capturar aspectos relacionados à tecnologia seriam bem-vindas, pois indicadores utilizados na literatura, como o uso de energia por setor em bases municipais (ou por concentração urbana) não estão disponíveis no Brasil.

Análises futuras poderiam expandir esta pesquisa em várias direções. Em primeiro lugar, pesquisadores e formuladores de políticas estão preocupados com a influência da urbanização iminente sobre a poluição local do ar e a saúde humana. Análises adicionais poderiam focar especificamente o impacto da configuração urbana na exposição a poluentes (por exemplo, material micro-particulado) ou na saúde (doenças respiratórias, cardiovasculares, saúde mental, bem-estar). Em segundo lugar, a análise poderia ser ampliada para considerar o impacto de políticas urbanas, como regras de zoneamento ou limites construtivos, tanto na configuração urbana quanto nas emissões. Trabalhos futuros também poderiam investigar o subconjunto de cidades onde há dados disponíveis sobre sua interconectividade, buscando uma melhor compreensão de como o papel de uma cidade na economia global e nas hierarquias regionais pode influenciar seus níveis de poluição (Derudder *et al.*, 2003).

---

<sup>99</sup> Não foram encontrados dados disponíveis anteriores a 2010 que permitissem a ampliação da análise para além do teste com a *dummy* realizada na seção anterior.

Por fim, tecnicamente a modelagem poderia ser aperfeiçoada com o emprego de ferramentas de análise espacial, como os modelos de painel dinâmico e espacial. Alguns autores argumentam sobre a importância de se considerar tanto efeitos dinâmicos das emissões de gases de efeito estufa devido a um componente de persistência temporal, quanto efeitos espaciais, devido a possíveis correlações e dependências espaciais das emissões (Cheng; Hu, 2023). Os testes realizados nesse sentido com a base de dados disponível não se mostraram satisfatórios, especialmente devido às limitações temporais.

### **3.7. Implicações para Políticas Públicas**

Ao se considerar políticas públicas que visam favorecer o desenvolvimento urbano sustentável, compacto, com alta densidade e pouco fragmentação, é necessário reconhecer os diferentes aspectos que estão por trás da tendência oposta, qual seja, da dispersão urbana. Por um lado, ela reflete em parte a escolha do consumidor - uma escolha racional de um grande lote em detrimento de outros produtos de consumo, potencializada por movimentos de redução nos custos do transporte e pelo desenvolvimento de tecnologias de comunicação. Por outro lado, o desenvolvimento menos sustentável também pode ser uma resposta a políticas públicas, como limitações à densificação, deterioração de áreas centrais, falta de investimento em transporte coletivo. Os planejadores têm à disposição algumas ferramentas com potencial para influenciar a estrutura espacial urbana: regulamentações de uso do solo, investimentos em infraestrutura e tributação.

Com base nos resultados desenvolvidos neste artigo, destacam-se abaixo algumas políticas urbanas que podem afetar a forma espacial das cidades e também influenciar as emissões de CO<sub>2</sub> nas concentrações urbanas brasileiras. Conforme destacado ao longo do texto, os impactos estimados da forma urbana sobre as emissões dependem de políticas adequadas. Além disso, cabe ressaltar a necessidade de adaptação ao contexto específico de cada cidade, pois fatores como renda e estrutura populacional afetam a eficácia de cada abordagem.

*Densificação, compactação e redução da fragmentação urbana:* concentrações urbanas com alta densidade populacional tendem a ter menores emissões de carbono total e per capita (considerando as emissões eminentemente urbanas – ligadas aos setores de energia, produção industrial e resíduos), principalmente por incentivar o uso de transporte público e reduzir a dependência de automóveis. Adicionalmente, políticas que incentivam a construção ou uso de moradias em áreas urbanas centrais (como a revitalização de áreas centrais, por exemplo) podem contribuir para reduzir as emissões totais, já que moradores dessas áreas frequentemente

fazem trajetos mais curtos e utilizam meios de transporte mais sustentáveis. Em sentido oposto, cuidado redobrado deve ser tomado com políticas de moradia que incentivem a construção em áreas periféricas isoladas, especialmente aquelas que elevam a fragmentação na franja urbana (área periférica).

Alguns trabalhos sugerem que o planejamento urbano voltado para a sustentabilidade deve buscar um equilíbrio entre a inclusão de áreas verdes e a compactação urbana. Cidades com áreas verdes bem distribuídas e conectadas (por meio de corredores ecológicos, por exemplo) tendem a reduzir os impactos negativos da elevada fragmentação, pois criam um ambiente urbano mais integrado e menos dependente do transporte privado (Jim; Chen, 2009). Estudos mostram que cidades com planejamento ecológico que incorpora áreas verdes de maneira estratégica, como Cingapura e Vancouver, conseguem manter um equilíbrio entre fragmentação e conectividade, utilizando a vegetação como elemento de mitigação de emissões, sem comprometer a eficiência do espaço urbano (Beatley, 2011; Chang; Lee, 2017).

Segundo Nadalin (2010), *“promover a urbanização compacta, permitindo que habitantes preenham a infraestrutura existente, implica levar menos infraestrutura às periferias, desmatar menos áreas protegidas, andar menos de carro e poluir menos o ar, objetivos de uma cidade sustentável”*. Uma política de incentivo à cidade compacta tende a promover a moradia em áreas centrais, as quais geralmente contam com melhor infraestrutura urbana (linhas de ônibus, estações de metrô e de trem, praças, calçadas, bibliotecas, equipamentos culturais, etc.).

*Incentivo ao transporte público e pedonal:* deve-se destacar a importância de políticas de transporte público como fator crucial para reduzir as emissões de GEE nas áreas urbanas. As cidades que investem em infraestrutura de transporte coletivo eficiente, como metrô e ônibus rápidos, facilitam a substituição do uso do carro pelo transporte público, diminuindo as emissões. Subsídios e investimentos em transporte público podem aumentar a acessibilidade e atratividade desses modos de transporte. Adicionalmente, deve-se enfatizar a importância de aspectos como a “caminhabilidade” e mobilidade ativa, que complementam o transporte público, especialmente em grandes cidades. A importância deste aspecto, no contexto do presente trabalho, está em possibilitar que os ganhos da maior densidade e menor dispersão convertam-se, efetivamente, em redução das emissões. Isto porque, como discutido ao longo do texto, a redução das distâncias propiciada pela maior densidade, maior compactação e menor fragmentação pode ser compensada, por exemplo, pelo maior número de viagens (dada a redução no custo unitário das viagens). Assim, políticas de adensamento devem ser

complementadas por aquelas que permitam a substituição do automóvel individual, cuja decisão passa por questões relacionadas às condições de acesso e de segurança, dentre outros. Como destacado desde Jacobs (1961), a criação de ruas amigáveis aos pedestres está diretamente relacionada à forma urbana sustentável, reduzindo a necessidade do uso de carros e, conseqüentemente, a poluição.

*Regulamentações de uso do solo:* em áreas onde há limitações rígidas para construções residenciais densas, a demanda por moradias pode se deslocar para regiões suburbanas, aumentando o uso de veículos privados e, conseqüentemente, as emissões de CO<sub>2</sub>. Flexibilizar essas regulamentações e permitir construções mais densas nas áreas urbanas centrais poderia contribuir para um desenvolvimento urbano mais sustentável. Ademais, regulamentações que favorecem o uso misto do solo são relevantes para reduzir as distâncias entre trabalho, lazer e habitação, resultando em menores emissões de CO<sub>2</sub> devido à redução de deslocamentos longos.

*Impostos e incentivos para reduzir a emissão de veículos:* políticas como a taxação sobre emissões de veículos (por exemplo, impostos sobre combustíveis fósseis e até mesmo pedágios urbanos) poderiam ser eficazes para desincentivar o uso excessivo de veículos. Essas políticas incentivariam as pessoas a utilizar alternativas mais sustentáveis e ajudariam a internalizar os custos ambientais associados ao uso do automóvel. É necessário cuidado, no entanto, no que diz respeito às questões de justiça social e exclusão dos cidadãos ao direito à cidade. Se não acompanhadas da provisão efetiva de alternativas ao transporte individual, tais políticas podem amplificar as já enormes desigualdades sociais existentes no País.

Uma combinação estratégica de políticas dessa natureza pode facilitar a criação de cidades mais verdes e reduzir substancialmente as emissões de CO<sub>2</sub> associadas ao crescimento urbano. A coordenação entre regulamentações, infraestrutura e impostos mostra-se essencial para moldar a estrutura espacial urbana, ao mesmo tempo que um grande desafio devido à fragmentação entre níveis de governo e objetivos diversos (Bertaud, 2004).

No Brasil, as cidades enfrentam desafios estruturais que tornam o debate sobre sustentabilidade urgente e complexo. A urbanização acelerada do século XX resultou em desigualdades espaciais marcantes, com áreas centrais bem servidas e periferias carentes de infraestrutura básica. Tal contexto reforça a importância da compreensão dos fundamentos e políticas que favorecem ou desestimulam os potenciais positivos que as cidades podem trazer em termos econômicos, sociais e ambientais, sem os quais o resultado pode acabar com conseqüências negativas. Os planejadores urbanos devem monitorar as estruturas urbanas para

identificar tendências espaciais e entender as limitações que a estrutura atual impõe às opções de políticas públicas.

É importante reconhecer que as experiências brasileiras em planejamento urbano incluem os Planos Diretores Participativos, previstos no Estatuto da Cidade (BRASIL, 2001). Esses planos visam promover o uso social da propriedade e incentivam a ocupação de áreas centrais, com objetivo de reduzir a expansão horizontal e melhorar a mobilidade urbana. De todo modo, não é raro políticas que contradizem tais objetivos acabam ganhando relevância, a exemplo de políticas urbanas com incentivos de ocupação de territórios em áreas isoladas, muitas vezes sem infraestrutura urbana e com potencial de aumentar a fragmentação do espaço construído.

Também se identificam cidades com fortes limitações para o crescimento vertical e muito incentivo ao uso do transporte motorizado individual, com o exemplo extremo de Brasília. Quando não se pode densificar, por exemplo por limitações como o tombamento (no caso de Brasília) ou para evitar maior nível de concentração de poluentes, deve-se pensar em alternativas como novos centros de emprego (cidades policêntricas), porém atentando-se para questões como a busca pela compactação, evitando a fragmentação e áreas com elevadas limitações espaciais para a ocupação compacta.

### **3.8. Conclusões**

Este estudo teve como objetivo explorar quantitativamente a relação entre a configuração espacial urbana e as emissões de gases de efeito estufa (GEE). Para isso, foi utilizada uma base de dados única e uma abordagem multidimensional que representa diversos aspectos da forma urbana. A análise integrou dados de sensoriamento remoto e métricas espaciais para calcular indicadores de densidade urbana e dispersão espacial, sendo este último associado a características como fragmentação, centralidade e compacidade das áreas urbanas. Essas informações foram aplicadas a um modelo STIRPAT modificado, que incluiu aspectos relacionados à forma urbana aos tradicionais fatores explicativos de emissões de GEE (população, PIB per capita e tecnologia). O modelo foi utilizado para analisar as emissões nas concentrações urbanas brasileiras entre 1991 e 2010.

Os resultados da análise demonstraram que a densidade urbana tem um impacto significativo na redução das emissões de GEE, com uma elasticidade estimada de -0,737. Isso significa que um aumento de 1% na densidade urbana resulta em uma redução de 0,737% nas emissões de GEE per capita. Em contrapartida, a dispersão urbana apresentou uma elasticidade positiva de 2,915, indicando que um aumento de 1% na dispersão acarreta um crescimento de

2,915% nas emissões. As análises sugerem que o desenvolvimento urbano pode oferecer benefícios significativos na redução da poluição, especialmente ao promover maior densidade, crescimento compacto e redução da fragmentação nas franjas das cidades. Essas estratégias podem contribuir para a diminuição das emissões totais e per capita.

Com base nos resultados apresentados, diversas políticas urbanas podem contribuir para moldar a forma espacial das cidades brasileiras e reduzir as emissões de CO<sub>2</sub>, desde que adaptadas ao contexto específico de cada local. Políticas de densificação e compactação, como a revitalização de áreas centrais, incentivam o uso de transporte público e reduzem a dependência de automóveis, enquanto o cuidado com a fragmentação, especialmente nos limites urbanos, é crucial para evitar emissões adicionais. O investimento em transporte público eficiente, combinado com infraestrutura para mobilidade ativa, complementa estratégias de mitigação de emissões. Regulamentações de uso do solo que promovam construções densas e o uso misto do solo também são fundamentais para reduzir deslocamentos longos e as emissões associadas. Além disso, medidas fiscais, como a taxação de emissões de veículos, podem desincentivar o uso de automóveis, desde que acompanhadas de alternativas justas e acessíveis.

A redução de políticas que incentivam o espraiamento urbano, como subsídios ao transporte individual, habitação em áreas sem infraestrutura e zoneamentos que limitam a construção vertical, é essencial para promover cidades compactas e sustentáveis. Apesar de amplamente defendido, o planejamento urbano enfrenta desafios significativos, como resistência local, barreiras financeiras e a necessidade de altos investimentos em cidades já consolidadas. A integração de políticas urbanas exige coordenação entre regulamentações, infraestrutura e impostos, considerando as desigualdades urbanas e os possíveis impactos adversos, como maior exposição à poluição e intensificação das ilhas de calor. Preservar espaços abertos e abordar questões distributivas são passos fundamentais para garantir que os benefícios dessas políticas sejam amplamente acessíveis e não acentuem desigualdades sociais.



## REFERÊNCIAS

- ALBERTI, M. The effects of urban patterns on ecosystem function. **International regional science review**, v. 28, n. 2, p. 168-192, 2005.
- ALCOTT, B. Jevons' paradox. **Ecological Economics**, v. 54, n. 1, p. 9-21, 2005. Disponível em: <https://econpapers.repec.org/RePEc:eee:ecolec:v:54:y:2005:i:1:p:9-21>. Acesso em: 13 jan. 2025.
- ALONSO, W. **Location and Land Use: Toward a General Theory of Land Rent**. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1964.
- ANAS, A.; ARNOTT, R.; SMALL, K. A. Urban spatial structure. **Journal of Economic Literature**, v. 36, n. 3, p. 1426-1464, 1998.
- Andreoni, J.; Levinson, A. The simple economics of the environmental Kuznets curve. **Journal of Public Economics**, v. 80, n. 2, p. 269-286, 2001.
- ANGEL, S.; PARENT, J.; CIVCO, D. L.; BLEI, A. M. **Making Room for a Planet of Cities**. Cambridge, MA: Lincoln Institute of Land Policy, 2011.
- ARELLANO, M.; BOND, S. Some tests of specification for panel data: Monte Carlo evidence and an application to employment equations. **The Review of Economic Studies**, v. 58, n. 2, p. 277-297, 1991.
- BAI, X., SHI, P., e LIU, Y. (2012). Realizing China's urban dream. **Nature**, 509(7499), 158-160.
- BAI, Y.; DENG, X.; GIBSON, J.; ZHAO, Z.; XU, H. How does urbanization affect residential CO<sub>2</sub> emissions? An analysis on urban agglomerations of China. **Journal of Cleaner Production**, v. 209, p. 876-885, 2019.
- BRASIL. Lei nº 10.257, de 10 de julho de 2001. Regulamenta os artigos 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 11 jul. 2001.
- BEATLEY, T. **Biophilic Cities: Integrating Nature into Urban Design and Planning**. Washington, DC: Island Press, 2011.
- BERTAUD, A. The spatial organization of cities: deliberate outcome or unforeseen consequence? **Princeton: Princeton University**, 2004. Disponível em: [https://alainbertaud.com/wp-content/uploads/2013/06/AB\\_The\\_spatial\\_organization\\_of\\_cities\\_Presentation\\_2004.pdf](https://alainbertaud.com/wp-content/uploads/2013/06/AB_The_spatial_organization_of_cities_Presentation_2004.pdf). Acesso em: 20 out. 2024.
- BERTAUD, A.. **Order without design: How markets shape cities**. Mit Press, 2018.

- BLAUDIN DE THÉ, C.; CARANTINO, B.; LAFOURCADE, M. The carbon 'carprint' of urbanization: New evidence from French cities. **Regional Science and Urban Economics**, v. 89, 2021.
- BORCK, R.; SCHRAUTH, P. Population Density and Urban Air Quality. **Regional Science and Urban Economics**, v. 86, 2021.
- BRUECKNER, J. K. **The structure of urban equilibria: A unified treatment of the Muth-Mills model**. Handbook of Regional and Urban Economics, v. 2, p. 821-845, 1987.
- BRUECKNER, J. K. Urban sprawl: Diagnosis and remedies. **International Regional Science Review**, v. 23, n. 2, p. 160-171, 2000.
- CALTHORPE, P. **Urbanism in the Age of Climate Change**. Island Press, 2011.
- CARVALHO, M.; GOMES, A. O papel das cidades brasileiras na agenda de desenvolvimento sustentável global. **Revista Internacional de Urbanismo**, v. 5, n. 2, p. 15-28, 2018.
- CASTELLS-QUINTANA, D.; DIENESCH, E.; KRAUSE, M. Air pollution in an urban world: A global view on density, cities and emissions. **Ecological Economics**, v. 189, p. 107142, 2021.
- CHANG, J. H.; LEE, J. S. Integrating urban green spaces for environmental and social benefits: A comparative study of Singapore and Seoul. **Journal of Urban Planning and Development**, v. 143, n. 4, p. 1-11, 2017.
- CHEN, Z.; KONG, L.; WANG, M.; LIU, H.; XIAO, D.; WU, W. The effect of urban spatial form on energy efficiency: a cross-sectional study in China. **Energy Reports**, v. 6, n. 6, p. 1234–1249, 2020.
- CHENG, Z.; HU, X. The effects of urbanization and urban sprawl on CO<sub>2</sub> emissions in China. **Environment, Development and Sustainability**, v. 25, p. 1792–1808, 2023.
- CHENG, Zhonghua; LI, Lianshui; LIU, Jun. The impact of foreign direct investment on urban PM<sub>2.5</sub> pollution in China. **Journal of Environmental Management**, v. 265, p. 110532, 2020.
- CHENG, L.; MI, Z.; SUDMANT, A.; COFFMAN, D. Bigger cities better climate? Results from an analysis of urban areas in China. **Energy Economics**, v. 107, p. 105872, 2022.
- DASGUPTA, S.; LAPLANTE, B.; WANG, H.; WHEELER, D. Confronting the environmental Kuznets curve. **Journal of Economic Perspectives**, v. 16, n. 1, p. 147-168, 2002.
- DE BRUYN, S. M.; VAN DEN BERGH, J. C. J. M.; OPSCHOOR, J. B. Economic Growth and Emissions: Reconsidering the Empirical Basis of Environmental Kuznets Curves. **Ecological Economics**, v. 25, n. 2, p. 161–175, 1998. DOI: 10.1016/S0921-8009(97)00178-X.
- DERUDDER, B.; TAYLOR, P. J.; WITLOX, F.; CATALANO, G. Hierarchical tendencies and regional patterns in the world city network: a global urban analysis of 234 cities. **Regional Studies**, v. 37, n. 9, p. 875-886, 2003.
- DIETZ, T.; ROSA, E. A. Effects of population and affluence on CO<sub>2</sub> emissions. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 94, n. 1, p. 175-179, 1997.

EHRlich, P. R.; HOLDREN, J. P. Impact of population growth: Complacency concerning this component of man's predicament is unjustified and counterproductive. **Science**, v. 171, n. 3977, p. 1212-1217, 1971.

ELFAKI, K. E.; KHAN, Z.; KIRIKKALELI, D.; KHAN, N. On the nexus between industrialization and carbon emissions: evidence from ASEAN+3 economies. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, p. 31476–31485, 2022.

EWING, R. Is Los Angeles-style sprawl desirable? **Journal of the American Planning Association**, v. 63, n. 1, p. 107-126, 1997.

EWING, R.; CERVERO, R. Travel and the built environment: a meta-analysis. **Journal of the American Planning Association**, v. 76, n. 3, p. 265–294, 2010.

GALSTER, G.; HANSON, R.; RATCLIFFE, M. R.; WOLMAN, H.; COLEMAN, S.; FREIHAGE, J. Wrestling sprawl to the ground: defining and measuring an elusive concept. **Housing Policy Debate**, v. 12, n. 4, p. 681-717, 2001.

GLAESER, E. L. 2011. **Triumph of the City: How Our Greatest Invention Makes Us Richer, Smarter, Greener, Healthier, and Happier**. London: MacMillan. Glaeser e Kahn (2004)

GLAESER, E.; KAHN, M. E. The greenness of cities: carbon dioxide emissions and urban development. **Journal of Urban Economics**, v. 67, n. 3, p. 404–418, 2010.

GILL, S. E.; HANDLEY, J. F.; ENNOS, A. R.; PAULEIT, S. Adapting cities for climate change: the role of the green infrastructure. **Built Environment**, v. 33, n. 1, p. 115–133, 2007.

GROSSMAN, G. M.; KRUEGER, A. B. Economic growth and the environment. **The Quarterly Journal of Economics**, v. 110, n. 2, p. 353–377, 1995.

GONZÁLEZ, G. A. Urban sprawl, global warming and the limits of ecological modernization. **Environmental Politics**, v. 14, n. 3, p. 344–362, 2005.

GUDIPUDI, R.; FLUSCHNIK, T.; ROS, A. G. C.; WALTHER, C.; KROPP, J. P. City Density and CO2 Efficiency. **Energy Policy**, v. 91, p. 352–361, 2016.

GUO, R.; LENG, H.; YUAN, Q.; SONG, S. Impact of urban form on CO2 emissions under different socioeconomic factors: evidence from 132 small and medium-sized cities in China. **Sustainability**, v. 14, n. 22, p. 14967, 2022.

HARBAUGH, W. T.; LEVINSON, A.; WILSON, D. M. Reexamining the empirical evidence for an environmental Kuznets curve. **Review of Economics and Statistics**, v. 84, n. 3, p. 541–551, 2002.

HANKEY, S.; MARSHALL, J. D. Impacts of urban form on future US passenger-vehicle greenhouse gas emissions. **Energy Policy**, v. 38, n. 9, p. 4880–4887, 2010.

HICKMAN, R.; ASHIRU, O.; BANISTER, D. Transport and climate change: simulating the options for carbon reduction in London. **Transport Policy**, v. 17, n. 2, p. 110–125, 2010.

HIROMOTO, M. H. **Análise de três dimensões do Programa Minha Casa Minha Vida: Expansão Urbana, infraestrutura de saneamento e emprego**. 2018. 160 f. Tese (Doutorado em Administração Pública e Governo) – Fundação Getúlio Vargas, São Paulo, 2018.

HUANG, J.; LU, X. X.; SELLERS, J. M. A global comparative analysis of urban form: Applying spatial metrics and remote sensing. **Landscape and urban planning**, v. 82, n. 4, p. 184-197, 2007.

HUO, T.; XU, L.; FENG, W.; CAI, W.; LIU, B. Dynamic scenario simulations of carbon emission peak in China's city-scale urban residential building sector through 2050. **Energy Policy**, v. 159, 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Brasileiro de 1991**. Rio de Janeiro: IBGE, 1992.

\_\_\_\_\_. **Censo Brasileiro de 2000**. Rio de Janeiro: IBGE, 2002.

\_\_\_\_\_. **Censo Brasileiro de 2010**. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.

\_\_\_\_\_. (2016). Arranjos populacionais e concentrações urbanas no Brasil. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE. 167 p. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/divisao-regional/15782-arranjos-populacionais-e-concentracoes-urbanas-do-brasil.html?=&t=acesso-ao-produto>. Acesso em: mai. 2022.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA – Ipeadata. Dados macroeconômicos e regionais. Disponível em: <<http://www.ipeadata.gov.br>>.

JACOBS, J. **Morte e vida de grandes cidades**. São Paulo: Martins Fontes, 2000. (Título original: *The Death and Life of Great American Cities*, 1961).

JACOBS, J. **The economy of cities**. New York: Random House, 1969.

JÄNICKE, M.; WEIDNER, H. National environmental policies: a comparative study of capacity-building. **Springer Science & Business Media**, 1997.

JHA, R.; MURTHY, K. V. B. An inverse global environmental Kuznets curve. **Journal of Comparative Economics**, v. 31, n. 2, p. 352–368, 2003.

JIM, C. Y.; CHEN, W. Y. Ecosystem services and valuation of urban forests in China. **Cities**, v. 26, n. 4, p. 187–194, 2009.

JORGENSEN, A. K.; CLARK, B. Societies consuming nature: A panel study of the ecological footprints of nations, 1960–2003. **Social Science Research**, v. 40, n. 1, p. 226–244, 2011.

JORGENSEN, A. K.; RICE, J.; CLARK, B. Cities, slums, and carbon emissions: rethinking the drivers of urban environmental impacts. **Climatic Change**, v. 104, n. 3–4, p. 636–653, 2010.

KHEIRKHAH, Z.; MEHR, M. N. Elements and indicators of urban form: A meta-synthesis study. **Space Ontology International Journal**, v. 2, n. 2, p. 45, 2021.

LEE, S.; LEE, B. The influence of urban form on GHG emissions in the U.S. household sector. **Energy Policy**, v. 68, p. 534–549, 2014.

LEE, S.; LEE, B. Comparing the impacts of local land use and urban spatial structure on household VMT and GHG emissions. **Journal of Transport Geography**, v. 84, p. 102694, 2020.

LI, Z.; DENG, X.; PENG, L. Uncovering trajectories and impact factors of CO<sub>2</sub> emissions: a sectoral and spatially disaggregated revisit in Beijing. **Energy Policy**, v. 145, p. 111728, 2020.

LIN, S.; WANG, S.; MARINOVA, D.; ZHAO, D.; HONG, J. Impacts of urbanization and real economic development on CO<sub>2</sub> emissions in non-high income countries: empirical research based on the extended STIRPAT model. **Journal of Cleaner Production**, v. 166, p. 952-966, 2017.

LIU, Yuxin; FAN, Chenjing; XUE, Dongdong. A review of the effects of urban and green space forms on the carbon budget using a landscape sustainability framework. **Sustainability**, v. 16, n. 5, p. 1870, 2024.

LIU, J.; LI, M.; DING, Y. Econometric analysis of the impact of the urban population size on carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions in China. **Environment, Development and Sustainability**, v. 23, n. 12, p. 18186–18203, 2021.

MARSHALL, J. D. Energy-efficient urban form. **Environmental Science & Technology**, v. 42, n. 9, p. 3133–3137, 2008.

MARTÍNEZ-ZARZOSO, I.; MARUOTTI, A. The impact of urbanization on CO<sub>2</sub> emissions: evidence from developing countries. **Ecological Economics**, v. 70, n. 7, p. 1344-1353, 2011.

MILLS, E. S. Transportation and Patterns of Urban Development. An Aggregative Model of Resource Allocation in a Metropolitan Area. **The American Economic Review**, v. 57, n. 2, p. 197-210, 1967.

MILLS, E. S. **Studies in the Structure of the Urban Economy**. Baltimore: The Johns Hopkins Press, 1972.

MINX, J. C.; WIEDMANN, T.; WOOD, R.; PETERS, G. P.; LENZEN, M.; OWEN, A. Input–output analysis and carbon footprinting: an overview of applications. **Economic Systems Research**, v. 21, n. 3, p. 187–216, 2009.

MOOMAW, W. R.; UNRUH, G. C. Are environmental Kuznets curves misleading us? The case of CO<sub>2</sub> emissions. **Environment and Development Economics**, v. 2, n. 4, p. 451–463, 1997.

MONTE-MÓR, R. L. M. O que é o urbano no mundo contemporâneo. **Revista Paranaense de Desenvolvimento**, n. 111, p. 9–18, jul./dez. 2006.

MUTH, R. F. **Cities and Housing: The Spatial Pattern of Urban Residential Land Use**. Chicago: University of Chicago Press, 1969.

NADALIN, V. G.; IGLIORI, D. C. **Evolução urbana e espraiamento na Região Metropolitana de São Paulo**. Brasília: IPEA, 2010. (Texto para Discussão, n. 1481).

NADALIN, V.; IGLIORI D. Espreadimento urbano e periferização da pobreza na região metropolitana de São Paulo: evidências empíricas. **EURE (Santiago)**, v. 41, n. 124, 91-111, 2015.

NEWMAN, P.; KENWORTHY, J. R. **Sustainability and cities: overcoming automobile dependence**. Washington, D.C.: Island Press, 1999.

OJIMA, R. **Análise comparativa da dispersão urbana nas aglomerações urbanas brasileiras: elementos teóricos e metodológicos para o planejamento urbano e ambiental**. Tese (Doutorado em Demografia) – Instituto de Filosofia e Ciências Humanas da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

OJIMA, R. Dinâmicas metropolitanas e segregação socioespacial: tendências e desafios para a governança urbana. **Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais**, v. 18, n. 3, p. 12–25, 2016.

O'SULLIVAN, A. **Urban economics**. New York: McGraw-Hill, 2012.

PEROBELLI, F. S.; FARIA, W. R.; DE ALMEIDA VALE, V. The increase in Brazilian household income and its impact on CO<sub>2</sub> emissions: Evidence for 2003 and 2009 from input–output tables. **Energy Economics**, v. 52, p. 228-239, 2015.

PEZZEY, J. **Sustainable Development Concepts: An Economic Analysis**. Washington, D.C.: World Bank, 1989. (Environment Paper, n. 2).

PIRES, R.; COSTA, P. Planejamento urbano sustentável e instrumentos econômicos: uma análise para o Brasil. **Revista Brasileira de Desenvolvimento Urbano**, v. 6, n. 3, p. 45-63, 2019.

POLLONI-SILVA, E.; SILVEIRA, N.; FERRAZ, D.; MELLO, D. S.; MORALLES, H. F. The drivers of energy-related CO<sub>2</sub> emissions in Brazil: a regional application of the STIRPAT model. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, n. 36, p. 51014–51028, 2021.

POUMANYVONG, P.; KANEKO, S. Does urbanization lead to less energy use and lower CO<sub>2</sub> emissions? A cross-country analysis. **Ecological Economics**, v. 70, n. 2, p. 434–444, 2010.

Projeto MapBiomass. **Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil – Coleção 8.0**. Disponível em: [https://storage.googleapis.com/mapbiomas-public/initiatives/brasil/collection\\_8/downloads/statistics/tabela\\_geral\\_mapbiomas\\_col8\\_biomass\\_municipios.xlsx](https://storage.googleapis.com/mapbiomas-public/initiatives/brasil/collection_8/downloads/statistics/tabela_geral_mapbiomas_col8_biomass_municipios.xlsx). Acesso em 18 fev. 2024.

RABINOVITCH, J.; LEITMANN, J. Environmental innovation and management in Curitiba, Brazil. **Cities**, v. 13, n. 1, p. 1–15, 1996.

RICARDO, David. **Principles of political economy and taxation**. 3. ed. Londres: John Murray, 1821.

SADORSKY, P. The effect of urbanization on CO<sub>2</sub> emissions in emerging economies. **Energy Economics**, v. 41, p. 147–153, 2014.

Sarzynski, A. Bigger is not always better: a comparative analysis of cities and their air pollution impact. **Urban Studies**, v. 49, n. 14, p. 3121-3138, 2012.

SCHWARZ, N. Urban form revisited—Selecting indicators for characterizing European cities. **Landscape and Urban Planning**, v. 96, n. 1, p. 29–47, 2010. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2010.01.007.

SEEG – Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa. **Emissões totais no Brasil**. Disponível em: [https://plataforma.seeg.eco.br/total\\_emission](https://plataforma.seeg.eco.br/total_emission).

SELDEN, T. M.; SONG, D. Environmental quality and development: is there a Kuznets curve for air pollution emissions? **Journal of Environmental Economics and Management**, v. 27, n. 2, p. 147–162, 1994.

SETO, K. C.; FRAGKIAS, M. Quantifying spatiotemporal patterns of urban land-use change in four cities of China with time series landscape metrics. **Landscape Ecology**, v. 20, n. 7, p. 871–888, 2005.

SETO, K. C.; GÜNERALP, B.; HUTYRA, L. R. Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 109, n. 40, p. 16083–16088, 2014.

SHAFIK, N.; BANDYOPADHYAY, S. Economic growth and environmental quality: time series and cross-country evidence. **The World Bank**, 1992.

SHI, A. The impact of population pressure on global carbon dioxide emissions, 1975–1996: evidence from pooled cross-country data. **Ecological Economics**, v. 44, n. 1, p. 29–42, 2003.

SOTTO, D.; RIBEIRO, D. G.; ABIKO, A. K.; SAMPAIO, C. A. C.; NAVAS, C. A.; MARINS, K. R. D. C.; BUCKERIDGE, M. S. Sustentabilidade urbana: dimensões conceituais e instrumentos legais de implementação. **Estudos Avançados**, v. 33, n. 97, p. 61–80, 2019.

STERN, D. I.; COMMON, M. S.; BARBIER, E. B. Economic growth and environmental degradation: the environmental Kuznets curve and sustainable development. **World Development**, v. 24, n. 7, p. 1151–1160, 1996.

SU, S.; XIAO, R.; JIANG, Z.; ZHANG, Y. Characterizing landscape pattern and ecosystem service value changes for urbanization impacts at an eco-regional scale. **Applied Geography**, v. 34, p. 295–305, 2012.

SU, Q. Travel demand management policy instruments, urban spatial characteristics, and household greenhouse gas emissions from travel in the US urban areas. **International Journal of Energy Economics and Policy**, v. 7, n. 3, p. 157–166, 2017.

TURNER, W. A simple theory of smart growth and sprawl. **Journal of Urban Economics**, v. 61, p. 21–44, 2007.

VON THÜNEN, J. H. **The isolated state**. Translated by Carla M. Wartenberg. Oxford: Pergamon Press, 1966.

WEISZ, H.; STEINBERGER, J. K. Reducing energy and material flows in cities. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 2, n. 3, p. 185–192, 2010.

WU, J.; SHEN, W.; SUN, W.; TUELLER, P. T. Empirical patterns of the effects of changing scale on landscape metrics. **Landscape Ecology**, v. 17, n. 8, p. 761–782, 2002.

XIONG, Y.; DUAN, Z. Research on the response of air pollution to urban form and spatial optimization strategy based on mobile monitoring. SSRN **Electronic Journal**, 2020.

YANG, L.; XIA, H.; ZHANG, X.; YUAN, S. What matters for carbon emissions in regional sectors? A China study of extended STIRPAT model. **Journal of Cleaner Production**, v. 180, p. 595-602, 2018.

YI, Y.; WANG, Y.; LI, Y.; QI, J. Impact of urban density on carbon emissions in China. **Applied Economics**, v. 53, n. 53, p. 6153–6165, 2021.

YORK, R.; ROSA, E. A.; DIETZ, T. STIRPAT, IPAT and ImPACT: analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts. **Ecological Economics**, v. 46, n. 3, p. 351–365, 2003.

Young, C. E. F. (2018). Integração dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável: Um enfoque interdisciplinar e sistêmico. **Cadernos de Sustentabilidade Urbana**, 9(2), 12-25.

ZHANG, C.; LIN, Y. Panel estimation for urbanization, energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions: A regional analysis in China. **Energy Policy**, v. 49, p. 488–498, 2012.

ZHU, Q.; PENG, X. The impacts of population change on carbon emissions in China during 1978–2008. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 36, p. 1–8, 2012.



## APÊNDICES

### APÊNDICE 3.A. Definições e Resultados Adicionais

**Quadro 3.A-1:** Dimensões da configuração urbana – indicadores selecionados

| Dimensão                    | Indicador                                                             | Fórmula                                                                                                                      | Definição                                                                                                                                                                                                                    | Interpretação                                                                                                                                                                                                                                                        |
|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Urbanização                 | Razão entre população urbana e população total (URB)                  | $URB = \frac{pop\_urb_i}{pop\_tot_i}$                                                                                        | em que $pop\_urb_i$ é o número de pessoas residentes em setores urbanos da concentração urbana $i$ e...                                                                                                                      | ... $pop\_tot_i$ é a população total em cada concentração                                                                                                                                                                                                            |
| Densidade demográfica       | Razão entre a população total e a área total do limite administrativo | $dens\_demog = \frac{pop\_tot_i}{area\_adm_i}$                                                                               | em $pop\_tot_i$ é a população total em cada concentração urbana $i$ e...                                                                                                                                                     | ... $area\_adm_i$ é área delimitada pelo limite administrativo dos municípios que compõem a concentração urbana                                                                                                                                                      |
| Densidade urbana            | Razão entre a população urbana e a área da mancha urbana              | $dens\_urb = \frac{pop\_urb_i}{area\_urb_i}$                                                                                 | em $pop\_urb_i$ é a população urbana em cada concentração urbana $i$                                                                                                                                                         | ... $area\_urb_i$ é área urbanizada dentro dos limites dos municípios que compõem a concentração urbana                                                                                                                                                              |
| Centralidade                | Centralidade do maior fragmento (CE)                                  | $CE = \frac{R}{\sum_{i=1}^{N-1} D_i / N - 1} \times 100$<br>$= \frac{\sqrt{S/\pi}}{\sum_{i=1}^{N-1} D_i / N - 1} \times 100$ | em que $S$ é a área de resumo de todos os patches (área urbanizada), $R$ é o raio de um círculo com área de $S$ , $D_i$ é a distância do centroide do patch $i$ ao centroide do maior patch, $N$ é o número total de patches | O índice de centralidade indica a razão entre o raio de um círculo de área igual à área urbana em questão e a distância média dos fragmentos urbanos em relação ao maior fragmento (patch). Mensura a forma geral da cidade, ou seja, se ela é alongada ou circular. |
| Compacidade                 | Índice de compacidade (CI)                                            | $CI = \frac{\sum_i P_i / p_i}{N^2} \times 100$<br>$= \frac{\sum_i 2\pi\sqrt{s_i/\pi}/p_i}{N^2} \times 100$                   | si e pi são a área e o perímetro do patch $i$ , $P_i$ é o perímetro de um círculo com a área de si e $N$ é o número total de patches                                                                                         | O IC indica compacidade e é maior para paisagens mais regulares (perímetro mais próximo de um círculo de igual área) e com baixo número de manchas.                                                                                                                  |
| Complexidade dos fragmentos | Índice de forma média ponderada por área (AWMSI)                      | $AWMSI = \frac{\sum_{i=1}^N p_i / 4\sqrt{s_i} \times s_i / \sum_{i=1}^N s_i}{N}$                                             | si e pi são a área e o perímetro do patch $i$ e $N$ é o número total de patches                                                                                                                                              | AWMSI indica a irregularidade das manchas. É menor para feições circulares ou células quadradas e aumenta com a irregularidade.                                                                                                                                      |

|                                  |                                                    |                                                                                        |                                                                                                                                 |                                                        |
|----------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Complexidade dos limites urbanos | Dimensão fractal média ponderada por área (AWMPFD) | AWMPFD= $\frac{\sum_{i=1}^N 2\ln 0.25 p_i / \ln s_i \times s_i / \sum_{i=1}^N s_i}{N}$ | AWMPFD indica a irregularidade do limite urbano. É menor para formas simples e aumenta conforme as formas ficam mais complexas. | Quanto maior, maior irregularidade dos limites urbanos |
|                                  |                                                    |                                                                                        |                                                                                                                                 |                                                        |

Fonte: Elaboração própria

**Tabela 3.A-1:** Análise da correlação de Pearson entre variáveis selecionadas

|                      | <i>dens_geog</i> | <i>dens_urb</i> | <i>dispersao</i> | <i>urb</i> | <i>pop_tot_censo</i> | <i>pib_pc</i> | <i>pib_serv_part</i> | <i>pib_ind_part</i> |
|----------------------|------------------|-----------------|------------------|------------|----------------------|---------------|----------------------|---------------------|
| <i>dens_geog</i>     | 1                |                 |                  |            |                      |               |                      |                     |
| <i>dens_urb</i>      | 0,477***         | 1               |                  |            |                      |               |                      |                     |
| <i>dispersao</i>     | -0,356***        | 0,068           | 1                |            |                      |               |                      |                     |
| <i>urb</i>           | 0,302***         | -0,105          | -0,431***        | 1          |                      |               |                      |                     |
| <i>pop_tot_censo</i> | 0,812***         | 0,369***        | -0,270***        | 0,175*     | 1                    |               |                      |                     |
| <i>pib_pc</i>        | 0,229**          | -0,291***       | -0,344***        | 0,453***   | 0,206*               | 1             |                      |                     |
| <i>pib_serv_part</i> | 0,196*           | 0,245**         | -0,024           | 0,119      | 0,176*               | -0,426***     | 1                    |                     |
| <i>pib_ind_part</i>  | -0,009           | -0,195*         | -0,251**         | 0,277***   | -0,081               | 0,598***      | -0,832***            | 1                   |

\* Correlação é significativa ao nível de 0,05 (teste bicaudal).

\*\* Correlação é significativa ao nível de 0,01 (teste bicaudal).

\*\*\* Correlação é significativa ao nível de 0,001 (teste bicaudal).

Fonte: Elaboração própria

**Tabela 3.A-2:** Resultados da regressão em painel para Emissões Urbanas de GEE

|                               | <i>log(gee_urb_mm+1)</i> |                        |                     |
|-------------------------------|--------------------------|------------------------|---------------------|
|                               | POLS rob. (1)            | EA rob. (2)            | EF rob. (3)         |
| <i>log(dens_geog + 1)</i>     | 0,001<br>(0,091)         | 1,255***<br>(0,358)    | 1,704***<br>(0,532) |
| <i>log(dispersao + 1)</i>     | 1,800***<br>(0,614)      | 2,797**<br>(1,380)     | 1,967<br>(1,498)    |
| <i>log(pop_tot_censo + 1)</i> | 1,095***<br>(0,067)      | 2,626***<br>(0,282)    | 3,605***<br>(0,479) |
| <i>log(pib_pc + 1)</i>        | 1,007***<br>(0,102)      | 2,309***<br>(0,197)    | 1,865***<br>(0,246) |
| <i>pib_ind_part</i>           | -1,226***<br>(0,384)     | -0,700<br>(0,565)      | 0,343<br>(0,647)    |
| Constante                     | -4,771***                | -28,880***<br>(0,924)  |                     |
| Efeitos Individuais           | Não                      | Sim (EA)               | SIM (EF)            |
| Observações                   | 465 (i=155)              | 465 (i=155)            | 465 (i=155)         |
| R <sup>2</sup>                | 0,670                    | 0,703                  | 0,777               |
| R <sup>2</sup> Ajustado       | 0,667                    | 0,700                  | 0,661               |
| Estatística F                 | 168,389***               | $\chi^2 = 795,975$ *** | 139,072***          |

Notas: Níveis de significância: \* $p < 0,1$ ; \*\* $p < 0,05$ ; \*\*\* $p < 0,01$

Painel Balanceado; EF: Efeitos Fixos/ EA: Efeitos Aleatórios; Erros-padrão robusto entre parênteses

Fonte: Elaboração própria

**Tabela 3.A-3:** Resultados da regressão em painel para Emissões Urbanas de GEE

|                         | <i>log(gee_urb_mm+1)</i> |                      |                      |                      |
|-------------------------|--------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|                         | EF rob. (1)              | EF rob. (2)          | EF rob. (3)          | EF rob. (4)          |
| log(dens_urb + 1)       | -0,649***<br>(0,236)     | -0,543**<br>(0,238)  | -0,789***<br>(0,237) | -0,906***<br>(0,243) |
| log(CE + 1)             | 1,275<br>(1,272)         |                      |                      |                      |
| log(CI + 1)             |                          | -12,571**<br>(4,974) |                      |                      |
| log(AWMSI + 1)          |                          |                      | 3,546<br>(2,335)     |                      |
| log(AWMPFD + 1)         |                          |                      |                      | 17,523**<br>(7,205)  |
| log(pop_tot_censo + 1)  | 4,052***<br>(0,370)      | 4,047***<br>(0,354)  | 4,179***<br>(0,360)  | 4,238***<br>(0,344)  |
| log(pib_pc + 1)         | 1,830***<br>(0,242)      | 1,815***<br>(0,238)  | 1,814***<br>(0,240)  | 1,817***<br>(0,236)  |
| pib_ind_part            | 0,591<br>(0,686)         | 0,665<br>(0,633)     | 0,597<br>(0,697)     | 0,601<br>(0,693)     |
| Efeitos Individuais     | Não                      | Sim (EA)             |                      | SIM (EF)             |
| Observações             | 465 (i=155)              | 465 (i=155)          |                      | 465 (i=155)          |
| R <sup>2</sup>          | 0,777                    | 0,781                | 0,777                | 0,780                |
| R <sup>2</sup> Ajustado | 0,661                    | 0,667                | 0,661                | 0,665                |
| Estatística F           | 142,410***               | 143,012***           | 136,812***           | 136,111***           |

Notas: Níveis de significância: \* $p < 0,1$ ; \*\* $p < 0,05$ ; \*\*\* $p < 0,01$

Painel Balanceado; EF: Efeitos Fixos/ EA: Efeitos Aleatórios; Erros-padrão robusto entre parênteses

Fonte: Elaboração própria

## Conclusão Geral

Esta tese teve como propósito elucidar as tendências relacionadas à forma urbana no contexto brasileiro e relacioná-las às emissões de gases de efeito estufa. Especificamente, tratou-se da configuração urbana no que diz respeito a dois aspectos: densidade e dispersão. Para tanto, foi necessária a criação de um banco de dados específico composto por diferentes indicadores que possibilitam mensurar tais conceitos. Foram então aplicadas técnicas econométricas para relacionar a configuração urbana às emissões e discutir políticas públicas pertinentes que possam ajudar a combater as emissões no contexto urbano. O Quadro-Resumo abaixo resume os principais objetivos, métodos e resultados de cada artigo que compõe esta tese.

No primeiro artigo, explorou-se a relação entre densidade urbana e emissões urbanas de GEE, considerando-se diferentes recortes geográficos. O impacto da densidade urbana nas emissões é estimado em -1,22 (elasticidade) para as AMC's, sendo reduzido para -0,864 quando se trata de áreas pertencentes a concentrações urbanas. O segundo artigo dedicou-se a desenvolver métricas relacionadas à configuração espacial das áreas urbanas. Foram calculados índices de centralidade, compacidade, complexidade dos limites urbanos e complexidade dos fragmentos para as 187 concentrações urbanas existentes entre 1985 e 2022. Por fim, o terceiro artigo utiliza tais métricas para propor um indicador síntese denominado índice de dispersão. Com base nos indicadores calculados, corrobora-se a relevância dos aspectos urbanos para explicar os diferentes níveis de emissões de GEE nas concentrações urbanas brasileiras. O coeficiente relacionado à densidade urbana foi estimado em -0,74 neste contexto. Com relação ao índice de dispersão, o coeficiente estimado de 2,9 indica que 1% a mais no grau de dispersão urbana está associada a emissões urbanas de GEE 2,9% menores.

É importante salientar, para concluir, que as cidades brasileiras enfrentam diversos problemas sociais e ambientais, que vão além das emissões de gases de efeito estufa. O estudo não aborda temas como a exposição à poluição local, formação de ilhas de calor e outras questões enfrentadas nas cidades, as quais muitas vezes afetam a qualidade de vida e o bem-estar. Questões como pobreza e desigualdade devem ser consideradas na escolha das políticas públicas ligadas a cidades. Como desenvolvimentos futuros, os índices aqui desenvolvidos podem ser utilizados para testar os efeitos da densidade urbana, dispersão, centralidade, compactação e fragmentação também em outros aspectos da vida nas cidades, ampliando-se o olhar a partir do embasamento em dados e evidências.

**Quadro-Resumo:** Principais objetivos, métodos e resultados de cada artigo desenvolvido

| <b>Artigo</b>                                                                                                                                              | <b>Objetivos</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | <b>Métodos</b>                                                                                                                                                                                                                                                                            | <b>Principais resultados</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. O impacto da densidade urbana nas emissões de gases de efeito estufa: evidências para o Brasil em múltiplas escalas com dados em painel                 | Contribuir com o entendimento dos fatores que impactam emissões de gases de efeito estufa no contexto urbano. Em particular, detalhar os impactos ligados à densidade urbana nas regiões urbanas brasileiras.                                                                                                                                            | Estimação de modelo econométrico com dados em painel, com controle para efeitos individuais, considerando diferentes níveis de agregação espacial: Áreas Mínimas Comparáveis (AMC), microrregiões, mesorregiões e Unidades da Federação (UF).                                             | O impacto da densidade urbana nas emissões é estimado em -1,22 (elasticidade) para as AMC's, sendo reduzido para -0,864 quando se trata de áreas pertencentes a concentrações urbanas. A elasticidade da densidade varia entre -0,58 e -1,72 a depender do nível de agregação considerado.                                                                                                                                                                                |
| 2. Análise da forma urbana em concentrações brasileiras: métricas espaciais a partir de dados de sensoriamento remoto impacto                              | Construir uma base de dados que retrata aspectos espaciais da forma urbana no Brasil. Especificamente, buscou-se indicadores que permitam a caracterizar da configuração espacial das concentrações urbanas brasileiras, sua evolução ao longo do tempo, bem como a comparação entre áreas distintas.                                                    | Foram calculados cinco indicadores da configuração espacial derivados das métricas de paisagem: extensão, centralidade, compactidade, complexidade dos limites urbanos e complexidade para 187 concentrações brasileiras nos anos de 1985, 1991, 2000, 2010, 2015 e 2022.                 | Os resultados indicam, dentre outras coisas, que a área urbana média das concentrações brasileiras aumentou de 36,69 km <sup>2</sup> (1985) para 103,60 km <sup>2</sup> (2022). A complexidade dos fragmentos e dos limites urbanos diminuiu. Belém/PA destacou-se pela elevada complexidade dos fragmentos e Baixada Santista/SP pelos limites urbanos. Manaus e Goiânia/GO apresentaram alta centralidade, enquanto Curitiba/PR e Itajubá/MG foram altamente compactas. |
| 3. Impactos da configuração espacial urbana nas emissões de gases de efeito estufa: análise da densidade e dispersão nas concentrações urbanas brasileiras | Aprofundar o entendimento da relação entre forma urbana e as emissões de GEE e ressaltar possíveis propostas de políticas públicas urbanas que visam a mitigação dessas emissões. São avaliados, particularmente, os efeitos da densidade urbana e da dispersão espacial, mensurados com base em indicadores desenvolvidos nos artigos 1 e 2 desta tese. | Estimação de modelo econométrico com dados em painel para concentrações urbanas em 1991, 2000 e 2010, com controle para efeitos individuais. Seguiu-se a estrutura de um modelo IPAT modificado, com inclusão das variáveis de densidade urbana e dispersão espacial entre as covariadas. | As estimativas apontam para a relevância dos aspectos urbanos para explicar os diferentes níveis de emissões de GEE nas concentrações urbanas brasileiras entre 1991 e 2010. O coeficiente relacionado à densidade urbana foi estimado em -0,74. Com relação ao índice de dispersão, o coeficiente estimado de 2,9 indica que 1% a mais no grau de dispersão urbana está associada a emissões urbanas de GEE 2,9% menores.                                                |

Fonte: Elaboração própria