



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES

MARIA CRISTINA CAVALCANTE BELO

**INFERÊNCIA CAUSAL NO DIAGNÓSTICO ESTRATÉGICO DAS
DESIGUALDADES SOCIOESPACIAIS NA ACESSIBILIDADE E MOBILIDADE AO
TRABALHO EM FORTALEZA**

FORTALEZA

2023

MARIA CRISTINA CAVALCANTE BELO

INFERÊNCIA CAUSAL NO DIAGNÓSTICO ESTRATÉGICO DAS DESIGUALDADES
SOCIOESPACIAIS NA ACESSIBILIDADE E MOBILIDADE AO TRABALHO EM
FORTALEZA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Planejamento e Operação de Sistemas de Transportes.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Felipe Grangeiro Loureiro.

FORTALEZA

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- B39i Belo, Maria Cristina Cavalcante.
 Inferência causal no diagnóstico estratégico das desigualdades socioespaciais na acessibilidade e mobilidade ao trabalho em Fortaleza / Maria Cristina Cavalcante Belo. – 2023.
 117 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2023.
 Orientação: Prof. Dr. Carlos Felipe Grangeiro Loureiro.
1. Desigualdades Socioespaciais na Acessibilidade. 2. Diagnóstico Estratégico. 3. Mobilidade Urbana.
 4. Inferência Causal. I. Título.

CDD 388

MARIA CRISTINA CAVALCANTE BELO

INFERÊNCIA CAUSAL NO DIAGNÓSTICO ESTRATÉGICO DAS DESIGUALDADES
SOCIOESPACIAIS NA ACESSIBILIDADE E MOBILIDADE AO TRABALHO EM
FORTALEZA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Planejamento e Operação de Sistemas de Transportes.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Carlos Felipe Grangeiro Loureiro (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Moraes de Oliveira Neto
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francelino Franco Leite de Matos Sousa
Centro Universitário Christus (UNICHRISTUS)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço ao meu orientador, o Professor Felipe Loureiro, que me incentiva desde o início dessa jornada acadêmica. Minha admiração pelo seu trabalho já existia antes mesmo de nos conhecermos e aumentou ainda mais quando pude ver o amor genuíno que demonstra pelo ensino. Obrigada pelas reflexões e provocações que mantêm viva a fome pelo conhecimento.

Expresso aqui minha gratidão aos amigos que fiz nessa jornada, especialmente a Rubia, Larissa e Yago, companheiros de trabalhos e lazes. Quero agradecer especialmente a Rubia, tanto pela amizade quanto pelo suporte nas minhas passagens por Fortaleza. A todos do OPAMOS, saibam que sou muito grata por ter conhecido cada um. Compartilhar momentos de aprendizado com profissionais tão incríveis foi enriquecedor. Pude apreciar muito mais essa trajetória devido a presença de todos vocês.

A João Vitor, meu apoio constante, expresso minha mais profunda gratidão. Sua presença ao meu lado foi essencial. A admiração que nutro por você só reforça o que tenho de melhor em mim. Você sempre me inspira a ser minha melhor versão. Obrigada por tornar nosso caminho tão bonito.

Aos meus pais, fundamentais nesta jornada, minha gratidão é eterna. Sem o esforço e incentivo de vocês, eu nunca teria chegado aqui. Obrigada por tudo.

Agradeço à minha banca, os Professores Moraes e Franco, pelos ensinamentos, recomendações e provocações que enriqueceram este trabalho.

Por fim, gostaria de agradecer à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Funcap pelo apoio financeiro à esta pesquisa.

Da mesma forma que duas notas musicais discordantes tocadas ao mesmo tempo colocam em movimento uma composição musical, a dissonância em nossos pensamentos, ideias e valores nos compele a pensar, reavaliar e criticar. *A consistência é o parque de diversões das mentes entorpecidas.*
(Harari, 2015)

RESUMO

No atual paradigma do planejamento urbano integrado, a análise das causas da problemática urbana deve ser realizada no nível estratégico, buscando diagnosticar as desigualdades socioespaciais na acessibilidade e os seus efeitos sobre os padrões de mobilidade. Porém, as metodologias encontradas na literatura apresentam deficiências no ferramental utilizado, não controlando problemas de endogeneidade e relações espúrias, sendo a teoria da inferência causal um caminho que vem se mostrando adequado para conduzir essas análises. Dessa forma, o objetivo principal deste trabalho de mestrado é desenvolver um método baseado na teoria da inferência causal para investigar os determinantes das desigualdades socioespaciais na acessibilidade e seus efeitos sobre os padrões de mobilidade, no nível estratégico do planejamento urbano integrado. Através da análise das propostas de diagnóstico, foi possível identificar as principais lacunas metodológicas. A proposta metodológica desenvolvida inicia com a definição das hipóteses e um mapa mental, que são apoiados por uma análise conceitual sobre o fenômeno. A partir do mapa mental, é formulado o diagrama causal, fazendo-se uma análise dos dados disponíveis que podem melhor representar o fenômeno em estudo. Em seguida, são realizados testes de correlação entre as variáveis no diagrama. Os modelos são então formulados e são realizados testes sobre as premissas do modelo para então se escolher o estimador. O método foi aplicado com dados da cidade de Fortaleza, sendo analisadas as causas das desigualdades socioespaciais na acessibilidade e seus efeitos sobre os padrões de mobilidade ao trabalho. Do ponto de vista metodológico, os resultados mostraram que a teoria da inferência causal traz uma importante contribuição para a análise do fenômeno da problemática da acessibilidade e mobilidade ao realizar uma análise conceitual para a formação e posterior teste de hipóteses. A utilização puramente do ferramental de inferência estatística, além de estar suscetível aos vieses causados por endogeneidade ou má especificação dos modelos, podem levar a má interpretação dos resultados. Os resultados da análise fenomenológica para a cidade de Fortaleza apoiaram a hipótese de *spatial mismatch* entre a população de baixa renda e seus empregos. Existem evidência para se acreditar que a população que vive nas periferias possuem uma pior acessibilidade, bem como que a população de baixa renda é a mais prejudicada por esse problema. As características do uso do solo se mostraram mais relevantes sobre a acessibilidade da população que utiliza o modo coletivo. Os resultados também apontam que, para a população de baixa renda, a melhoria na acessibilidade, apesar de não possuir resultados significativos no número de viagens, diminui as distâncias viajadas por modo motorizado. Dessa forma, é possível afirmar que a má

distribuição das atividades sobre o espaço é uma restrição maior do que as ineficiências no sistema de transportes, contribuindo para padrões de mobilidade menos sustentáveis.

Palavras-chave: desigualdades socioespaciais na acessibilidade; diagnóstico estratégico; mobilidade urbana; inferência causal.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Estrutura da dissertação	20
Figura 2 - Paradigma do planejamento da acessibilidade e mobilidade na urbe sustentável ...	24
Figura 3 - Problemas de desigualdades socioespaciais na acessibilidade urbana	25
Figura 4 – Proposta metodológica para o processo de planejamento da mobilidade urbana em um paradigma de planejamento urbano integrado.....	26
Figura 5 – Metodologia de avaliação diagnóstica dos problemas de desigualdades na acessibilidade e mobilidade urbana	28
Figura 6 - Método de caracterização da problemática das desigualdades na acessibilidade....	30
Figura 7 - Método de diagnóstico da problemática das desigualdades na acessibilidade	31
Figura 8 - Representação da problemática da acessibilidade e mobilidade urbana.....	32
Figura 9 – Representação conceitual dos subsistemas urbanos de atividades, uso do solo e transportes.....	33
Figura 10 - Representação conceitual simplificada dos determinantes das decisões de viagem	40
Figura 11 - Representação dos determinantes das desigualdades na acessibilidade e na mobilidade	47
Figura 12 - Representação das hipóteses de causalidade formuladas por Garcia <i>et al.</i> (2018)	49
Figura 13 - Hipóteses de causalidade formuladas por Sousa (2019).....	51
Figura 14 - Ilustração de estrutura de causalidade em modelos de regressão linear múltipla..	54
Figura 15 - Ilustração de estruturas alternativas de causalidade	54
Figura 16 - Exemplos de possíveis fontes de viés ilustradas através de um diagrama causal..	56
Figura 17 - Ilustração de um diagrama causal.....	59
Figura 18 – Etapas do método proposto	67
Figura 19 - Mapa mental das inadequações no uso do solo e sua relação com os padrões de mobilidade	79
Figura 20 - Mapa mental das inadequações nos transportes e sua relação com os padrões de mobilidade	82
Figura 21 - Diagrama causal da problemática das desigualdades na acessibilidade e mobilidade por motivo trabalho na cidade de Fortaleza.....	84
Figura 22 - Regiões e zonas de análise de Fortaleza.	86
Figura 23 - Espacialização dos indicadores de uso do solo.....	88
Figura 24 - Concentração de empregos e domicílios da alta e baixa renda por região de	

Fortaleza	88
Figura 25 - Espacialização dos indicadores de transportes	89
Figura 26 - Espacialização dos indicadores de acessibilidade	90
Figura 27 - Correlação entre os indicadores do transporte coletivo	94
Figura 28 - Resultados da estimação do modelo de medição	94
Figura 29 - Correlações residuais do modelo de transporte coletivo para baixa (esquerda) e alta (direita) renda.....	97
Figura 30 - Correlações residuais para o modelo do transporte motorizado individual para baixa (esquerda) e alta (direita) renda	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Medidas de avaliação de ajuste de modelos SEM de acordo com Hu e Bentler (1999)	76
Tabela 2 - Proporção de viagens e tempo médio viajado por cada classe em diferentes modos	81
Tabela 3 - Indicadores utilizados na aplicação	87
Tabela 4 - Correlações entre as variáveis através do coeficiente de Spearman e Moran bivariado	92
Tabela 5 - Resultados padronizados das estimativas da modelagem.....	99
Tabela 6 - Efeitos diretos sobre a produção das viagens, com e sem divisão por grupo socioeconômico	104
Tabela 7 - Estimativas do efeito da densidade de empregos sobre a acessibilidade com e sem a variável de controle	105
Tabela 8 - Estimativa dos efeitos totais e diretos sobre a distância média de viagens	105

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Impacto dos desequilíbrios nos subsistemas urbanos de atividades, uso do solo e transportes.....	34
Quadro 2 - Indicadores utilizados por Garcia et al. (2018)	50
Quadro 3 - Descrição dos indicadores utilizados com Sousa (2019)	53

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Contextualização da problemática motivadora da pesquisa.....	14
1.2	Descrição do problema de pesquisa	15
1.3	Questões de pesquisa.....	17
1.4	Objetivos	18
1.5	Estrutura da dissertação.....	19
2	DESIGUALDADES SOCIOESPACIAIS NA ACESSIBILIDADE aos empregos E SEUS IMPACTOS nos padrões de mobilidade	21
2.1	Introdução	21
2.2	Planejamento urbano integrado com foco na problemática das desigualdades na acessibilidade e mobilidade	23
2.3	Diagnóstico estratégico das desigualdades socioespaciais na acessibilidade e decorrentes padrões de mobilidade	26
2.4	Causas das desigualdades socioespaciais na acessibilidade urbana.....	31
2.4.1	Efeitos das características do uso do solo sobre as desigualdades na acessibilidade.....	35
2.4.2	Efeitos das características dos transportes sobre as desigualdades na acessibilidade.....	37
2.4.3	Efeitos das restrições dos indivíduos sobre as desigualdades na acessibilidade.....	38
2.5	Determinantes dos padrões de mobilidade urbana.....	39
2.6	Representação conceitual dos determinantes das desigualdades na acessibilidade e seus impactos na mobilidade urbana nas grandes cidades brasileiras	43
2.6.1	Inadequações do subsistema de uso do solo	44
2.6.2	Ineficiências no subsistema de transportes	46
3	VIÉS NAS RELAÇÕES DE CAUSALIDADE EM MODELOS ESTATÍSTICOS DA PROBLEMÁTICA DA ACESSIBILIDADE E MOBILIDADE URBANA	48
3.1	Propostas metodológicas de modelagem estatística da causalidade entre acessibilidade e mobilidade	49
3.1.1	Modelagem estatística em Garcia (2016).....	49
3.1.2	Modelagem estatística em Sousa (2019).....	51
3.2	Problemas de viés e interpretação causal em modelos estatísticos	53
3.3	Princípios da teoria da inferência causal	57
3.3.1	Diagramas causais	58

3.3.2 Independência entre variáveis e D-separação	60
3.3.3 Modelos de equações estruturais e variáveis latentes	61
3.3.4 Premissas nos modelos SEM	61
3.4 Considerações finais.....	63
4 PROPOSTA METODOLÓGICA DE ANÁLISE DA CAUSALIDADE ENTRE ACESSIBILIDADE E MOBILIDADE URBANA	65
4.1 Proposta metodológica	67
4.1.1 Definição das hipóteses causais	67
4.1.2 Zonas de análise e elaboração da base de dados	69
4.1.3 Análise da distribuição das restrições no território	71
4.1.4 Caracterização das associações	72
4.1.5 Formulação dos modelos.....	73
4.1.6 Requisitos dos testes e escolha do estimador	74
4.1.7 Estimação e avaliação do modelo	75
5 ANÁLISE DE CAUSALIDADE DAS DESIGUALDADES SOCIOESPACIAIS NA ACESSIBILIDADE E SEUS EFEITOS SOBRE OS PADRÕES DE MOBILIDADE EM FORTALEZA.....	78
5.1 Aplicação da proposta	78
5.1.1 Definição das hipóteses causais	78
5.1.2 Zonas de análise e construção da base de dados	84
5.1.3 Análise da distribuição das restrições no território	87
5.1.4 Caracterização das associações	90
5.1.5 Formulação dos modelos.....	92
5.1.6 Requisitos dos testes e escolha do estimador	95
5.1.7 Estimação e avaliação do modelo	96
5.2 Desigualdades socioespaciais na acessibilidade e seus efeitos sobre os padrões de mobilidade de Fortaleza.....	99
5.2.1 Efeitos das distâncias aos centros de empregos	99
5.2.2 Determinantes da acessibilidade	100
5.2.3 Determinantes da produção de viagens.....	101
5.2.4 Determinantes das distâncias médias percorridas	102
5.3 Crítica à modelagem das relações causais das desigualdades na acessibilidade e mobilidade	103

6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	106
6.1	Contribuições metodológicas	106
6.2	Contribuições fenomenológicas	108
6.3	Recomendações.....	110
	REFERÊNCIAS	112

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização da problemática motivadora da pesquisa

Nas últimas décadas, houve um acentuado crescimento da população no meio urbano (United Nations, 2019), ao mesmo tempo que a tecnologia gerou meios de transportes cada vez mais rápidos. Esses dois fatores, associados ao espraiamento das cidades, levaram ao aumento das distâncias e tempos de viagem, tendo como consequência uma maior dependência do automóvel privado (Pucher *et al.* 2007), ressaltando problemas ambientais e sociais (Banister, 2008). Tal contexto também tornou mais evidente a relação entre os problemas de transportes e o uso do solo, como já vem sendo apontado há algumas décadas (Owens, 1995; Priemus; Nijkamp; Banister, 2001). Na busca por soluções, o planejamento dos transportes evoluiu com foco na mobilidade sustentável (Banister, 2008), que está centrada na busca por sistemas de transporte mais eficientes e sustentáveis. Posteriormente, o foco se voltou para a acessibilidade, que possibilita a integração entre os subsistemas de transportes e de uso do solo.

De acordo com Bertolini, le Clercq e Kapoen (2005), o conceito de acessibilidade está ligado à ideia do que pode ser acessado e de como esse acesso pode acontecer a partir de um certo ponto. Ou seja, o que a acessibilidade mensura é a facilidade com a qual as pessoas conseguem se engajar nas atividades. Através da acessibilidade é então possível se analisar como as características do uso do solo e dos sistemas de transportes podem restringir o acesso e possibilitar o uso de modos menos poluentes e mais igualitários, guiando assim o planejamento urbano em direção à sustentabilidade. Cavalcante *et al.* (2020) nomearam o atual paradigma do planejamento urbano, baseado na ideia de integração entre os subsistemas de atividades (Lopes; Loureiro; Van Wee, 2018), uso do solo e transportes, e com foco na compreensão da problemática das desigualdades socioespaciais da acessibilidade, de *Planejamento da Acessibilidade e Mobilidade na Urbe Sustentável* (PAMUS).

Neste paradigma de planejamento urbano integrado, a adequada análise das relações entre os subsistemas urbanos deve ser realizada no nível estratégico do planejamento, iniciando com a investigação e compreensão das causas dos problemas antes de se propor sua solução (Ministério das Cidades, 2006; Institute of Transportation Engineers, 2016). Esse esforço analítico, chamado de diagnóstico ou avaliação dos problemas, para seguir as diretrizes do desenvolvimento sustentável, deve ser focado na acessibilidade e mobilidade (Garcia *et al.* 2018), sendo guiado pelos princípios da equidade, eficiência e resiliência

(ambiental) (Cavalcante, 2023). A relação entre desigualdades na acessibilidade e exclusão social é um tema que vem recebendo cada vez mais atenção, dada a extensão do problema nas zonas urbanas (Lucas, 2012), especialmente nas grandes cidades latino-americanas. Tal contexto problemático evidencia a importância em se levantar hipóteses sobre a relação causal entre os subsistemas e as desigualdades na acessibilidade, bem como o impacto dessa interação sobre a mobilidade e suas externalidades socioeconômicas e ambientais.

Propostas metodológicas encontradas na literatura (Ministério das Cidades, 2006; Garcia, 2016; Sousa, 2019) dividem o esforço analítico de compreensão da problemática das desigualdades socioespaciais na acessibilidade em duas etapas principais: caracterização e diagnóstico. A caracterização inicia com a escolha dos indicadores que representam os problemas de desigualdades na acessibilidade e na mobilidade. As variáveis geralmente consistem em dados observacionais. Porém, quando não podem ser diretamente coletadas, modelos LUTI (*Land Use Transport Interaction*) agregados podem ser utilizados para simular decisões locacionais e de viagens, sendo a modelagem considerada como uma boa fonte de aprendizado sobre as relações de causa e efeito entre os subsistemas (Assis; Loureiro; Sousa, 2022). Já no diagnóstico, primeiramente são estabelecidas hipóteses que definem as direções e as relações (direta ou inversa) de causalidade entre os indicadores. Essas hipóteses passam então por uma análise exploratória, na qual se mensuram as correlações entre os indicadores. Por fim, se chega à etapa de análise confirmatória, na qual as hipóteses de causa e efeito devem ser verificadas, sendo normalmente utilizado o ferramental de regressão estatística, tanto a clássica como a espacial.

De acordo com Bollen (1989), a definição de causa possui três componentes: isolamento, associação e direção de influência. A associação entre duas variáveis não é suficiente, já que correlação não implica necessariamente em causalidade (Bollen, 1989). Além de associadas, as variáveis devem estar isoladas de quaisquer outras influências e o fluxo de ação deve estar bem estabelecido. Assim, dadas duas variáveis x e y , diz-se que x causa y quando: existe correlação estatística entre as duas variáveis; não existe influência de nenhuma outra variável; quando x varia, y também varia, mas o contrário não é válido.

1.2 Descrição do problema de pesquisa

O ferramental de inferência estatística utilizado nas atuais propostas metodológicas de diagnóstico estratégico da problemática urbana (Garcia, 2016; Sousa 2019) pode não ser suficientemente adequado para se analisar causalidade, já que não conta com

mecanismos para avaliar adequadamente o isolamento e a direção dos efeitos entre as variáveis analisadas. Podem ocorrer problemas devido a variáveis de confundimento, que são aquelas não explícitas no modelo estatístico, mas que podem afetar as estimativas devido a endogeneidade, situação definida como a existência de correlação entre uma variável explicativa e o erro (Louviere *et al.* 2005). Existe também o risco de se encontrar relações espúrias, ou seja, quando não existe relação causal entre as variáveis, mas a correlação é identificada pois elas são causa comum de uma terceira variável não explicitada (Pearl, 2000). Westreich e Greenland (2013) ainda alertam que, mesmo quando os modelos estatísticos são corretamente especificados, ainda podem ocorrer problemas quanto à interpretação dos coeficientes estimados, levando a conclusões incorretas sobre o fenômeno. Dessa forma, é necessária uma metodologia que esclareça as relações de causalidade no fenômeno das desigualdades socioespaciais na acessibilidade e seus efeitos sobre os decorrentes padrões de mobilidade.

Uma alternativa é a utilização de diagramas causais para embasar a formulação de modelos estatísticos multivariados, como proposto por Pearl (2000), de modo a estimar efeitos diretos e indiretos, com controle de variáveis de confundimento e verificação de hipóteses auxiliares. Essas foram as bases do que se conhece hoje como a teoria da inferência causal, que passou recentemente a receber mais atenção na investigação dos determinantes dos fenômenos nos transportes (Brathwaite; Walker, 2018). Alguns trabalhos (Siqueira; Loureiro; Lopes, 2021; Pinto *et al.* 2021) utilizaram a teoria da inferência causal para investigar relações entre acessibilidade e mobilidade a partir de uma abordagem desagregada ao nível do indivíduo. Enquanto a análise nesse nível de desagregação informa como os indivíduos tomam suas decisões, o diagnóstico territorial em nível estratégico visa identificar as áreas mais problemáticas e críticas, possibilitando a priorização de políticas públicas de uso do solo e intervenções em transportes (Sousa, 2019). Assim, o objeto de análise na investigação das desigualdades socioespaciais na acessibilidade em nível estratégico se trata de todo o território urbano, seja a nível apenas do município ou metropolitano.

Por se tratar de uma análise territorial, com foco nas interações entre as zonas, os dados costumam ser agregados em área. A utilização da inferência causal com esse tipo de dado no campo do planejamento urbano de transportes de passageiros é mais escassa. Um caso pode ser encontrado em Siqueira *et al.* (2022), que aplicaram essa teoria em nível estratégico para encontrar as restrições nos sistemas de uso do solo e transportes que possuem efeitos causais nas desigualdades da acessibilidade ao trabalho na cidade de Fortaleza. Esse trabalho, que tem um caráter fenomenológico, avança na compreensão das causas das

desigualdades na acessibilidade urbana de Fortaleza ao explicitar as fontes de endogeneidade nessas relações. Porém, ainda existem algumas lacunas, fenomenológicas e metodológicas, como a possibilidade em se avançar no entendimento do fenômeno de desigualdades urbanas ao se investigar os efeitos das desigualdades sobre a mobilidade e a falta de uma metodologia para guiar as análises dos determinantes das desigualdades na acessibilidade em nível estratégico de forma que se explicitem as fontes de endogeneidade nessas relações.

1.3 Questões de pesquisa

As causas dos problemas das desigualdades socioespaciais na acessibilidade urbana precisam ser identificadas para que objetivos e metas possam ser traçados de forma mais socialmente justa no planejamento urbano estratégico, assim como soluções mais efetivas possam ser elaboradas para os problemas de mobilidade no planejamento de transportes. Tendo em vista que o diagnóstico é a etapa em que as relações de causa-efeito devem ser investigadas e que as metodologias encontradas na literatura apresentam possíveis deficiências no ferramental utilizado, sendo a teoria da inferência causal um caminho que vem se mostrando adequado para conduzir essas análises, a questão central desta pesquisa é: *Como aplicar a teoria da inferência causal no diagnóstico estratégico das desigualdades socioespaciais na acessibilidade e seus efeitos sobre a mobilidade urbana?*

Dentro da lógica da inferência causal, para que a realidade possa ser adequadamente representada, faz-se necessária uma fundamentação teórica que permita justificar hipóteses de causa-efeito, traduzidas em diagramas causais. Uma representação conceitual, consolidando um arcabouço teórico do conhecimento sobre as relações causais envolvidas nos fenômenos em estudo, pode auxiliar nessa tarefa. De acordo com Sousa (2019), entender quais são as causas dos problemas de desigualdades socioespaciais no acesso às oportunidades pressupõe levantar hipóteses de causa-efeito das restrições que configuram e modificam os níveis de acessibilidade dos grupos vulneráveis e privilegiados. Dessa forma, chega-se à primeira questão específica deste trabalho, que é: *Quais são os fatores apontados na literatura como determinantes das restrições à acessibilidade e como essa interação afeta os padrões de mobilidade?*

As ferramentas de inferência estatística, apesar de identificarem a correlação entre a acessibilidade, suas restrições e seus recorrentes padrões de mobilidade, podem falhar em verificar o tipo e a direção desses efeitos causais, assim como desconsiderar outras variáveis explicativas e possíveis causas em comum. As fontes de endogeneidade podem provocar vies

nos resultados e a falta de clareza sobre as relações entre as variáveis pode levar a má interpretação dos resultados. Assim, a segunda questão específica deste trabalho é: *Como os resultados da inferência estatística podem ser afetados ao não se controlar adequadamente as fontes de endogeneidade?*

As análises encontradas na literatura avançam no entendimento sobre a problemática das desigualdades socioespaciais na acessibilidade e seus efeitos sobre os padrões de mobilidade. Porém, ainda existe lacunas sobre essas relações para as grandes cidades brasileiras, especialmente no que concerne aos efeitos sobre a mobilidade. Dessa forma, a terceira e última questão específica desta dissertação é: *Como uma proposta metodológica baseada na inferência causal avança no entendimento sobre a problemática das desigualdades socioespaciais na acessibilidade e seus efeitos sobre os padrões de mobilidade urbana para as grandes cidades brasileiras?*

1.4 Objetivos

Considerando o problema e as questões de pesquisa apresentadas acima, o objetivo geral desta dissertação é desenvolver e aplicar uma proposta metodológica baseada na teoria da inferência causal para investigar os determinantes das desigualdades socioespaciais na acessibilidade e seus efeitos sobre os padrões de mobilidade, no nível estratégico do planejamento urbano integrado. Para isso, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

a) Representar conceitualmente como os subsistemas urbanos de transportes, uso do solo e atividades formam as restrições que geram às desigualdades socioespaciais na acessibilidade e seus decorrentes padrões de mobilidade urbana para grandes cidades brasileiras;

b) Criticar a utilização do ferramental estatístico sem o devido controle da endogeneidade, identificando suas limitações na análise das relações de causalidade entre a acessibilidade e mobilidade urbana;

c) Propor um método para se analisar causalidade na problemática das desigualdades socioespaciais na acessibilidade e mobilidade, a partir de dados observacionais agregados sobre o território urbano;

d) Verificar a aplicabilidade do método proposto utilizando a cidade de Fortaleza como estudo de caso.

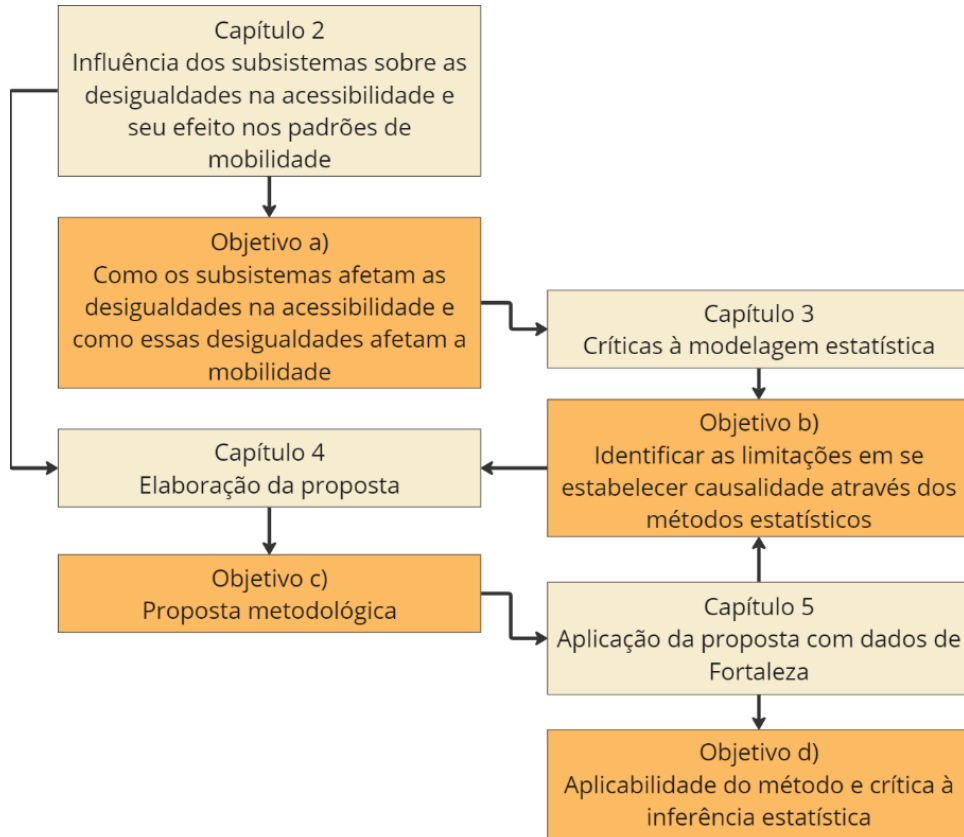
1.5 Estrutura da dissertação

Buscando contribuir nas questões de pesquisa e alcançar os objetivos estabelecidos, esta dissertação está estruturada, além desse capítulo introdutório, em mais quatro capítulos, como representado na Figura 1. No Capítulo 2 é realizada uma revisão teórica, de como funcionam os subsistemas de transportes, uso do solo e atividades, e de como cada um desses subsistemas urbanos influenciam na distribuição desigual dos níveis de acessibilidade, além de quais os efeitos das desigualdades na acessibilidade sobre os padrões de mobilidade. A partir disso, é construída uma representação conceitual sobre os determinantes das desigualdades socioespaciais na acessibilidade e seus efeitos sobre os padrões de mobilidade urbana em grandes cidades brasileiras, alcançando-se assim o objetivo (a). Essa representação conceitual possui como premissa que a acessibilidade é um produto da interação entre os três subsistemas, e por isso suas desigualdades socioespaciais devem ser fruto dos problemas internos em cada um deles.

No Capítulo 3, para atingir o objetivo (b), são analisadas as propostas atuais de modelagem das relações causais entre acessibilidade, mobilidade e suas restrições. Essas propostas de diagnóstico estratégico são baseadas no ferramental estatístico, que possui limitações para estabelecer relações de causalidade. São discutidas essas limitações, bem como as formas como os resultados das estimativas muitas vezes podem ser mal interpretados. As bases da teoria da inferência causal são então apresentadas de modo a permitir a construção de uma proposta que busque superar as limitações e dificuldades metodológicas identificadas.

Baseando-se no aprendizado e conhecimento produzidos nos capítulos anteriores, no Capítulo 4 é apresentada uma proposta metodológica para diagnosticar as desigualdades socioespaciais na acessibilidade e seus efeitos sobre a mobilidade, concretizando então o objetivo (c). O objetivo (d) é então alcançado no Capítulo 5, no qual o método proposto é aplicado em um estudo de caso, utilizando-se dados da cidade de Fortaleza. Nesse capítulo também são realizadas modelagens com os dados de Fortaleza para se compreender quais os problemas encontrados ao se utilizar apenas o ferramental de inferência estatística para analisar causalidade no fenômeno estudado.

Figura 1 - Estrutura da dissertação



Fonte: Elaborado pela autora.

2 DESIGUALDADES SOCIOESPACIAIS NA ACESSIBILIDADE AOS EMPREGOS E SEUS IMPACTOS NOS PADRÕES DE MOBILIDADE

2.1 Introdução

A crescente exploração de recursos energéticos marcou o início do século XX não só por possibilitar o vertiginoso avanço na tecnologia, mas também por acender o debate sobre sustentabilidade. Na área dos transportes, o grande aumento no número de automóveis gerou problemas como poluição do ar e sonora, congestionamentos, mal uso do solo para construção de infraestrutura, grande número de acidentes, entre outros. Dessa forma, tornou-se cada vez mais evidente que seria necessária uma mudança na forma de se pensar os sistemas de transportes, chegando-se assim ao conceito de mobilidade sustentável, que deve considerar a eficiência do sistema, o meio ambiente e a justiça social (Banister, 2008). Os dois primeiros temas receberam bastante atenção da comunidade técnica e científica, enquanto a dimensão social foi negligenciada (Jones; Lucas, 2012). Temas como justiça distributiva e equidade passaram a ser, de forma expressiva, alvo de pesquisa apenas na última década (Pereira; Herszenhut, 2022; Van Wee, 2022). Segundo Behbahani *et al.* (2019), existem duas categorias principais de equidade. A equidade horizontal (ou igualdade) admite que indivíduos, grupos ou áreas geográficas consideradas iguais devem ser tratadas de forma igual, recebendo quantidades iguais de recursos e custos. Já a chamada equidade vertical (ou simplesmente equidade) se relaciona à distribuição de efeitos entre indivíduos, grupos ou regiões que se diferenciam de acordo com suas necessidades ou habilidades. Essa categoria assume que políticas devem beneficiar os grupos e regiões em desvantagens, reduzindo assim as desigualdades.

Alterações no sistema urbano causam mudanças tanto no comportamento quanto no bem-estar de uma população, e as políticas públicas raramente são aplicadas igualmente sobre o espaço. Assim, os efeitos distributivos dos impactos devido a implementação de projetos, ou seja, a intensidade com a qual as mudanças são sentidas pelos indivíduos, pode variar sobre o espaço, ao longo do tempo e por classe social (Jones; Lucas, 2012). A maioria dos países costuma utilizar a análise de custo-benefício (CBA) como método de avaliação *ex ante* de projetos, prática que recebe bastante crítica (Van Wee; Geurs, 2011) pois, apesar de mensurar os benefícios gerados após a implementação, ignora os efeitos distributivos de tais políticas (Lucas; Van Wee; Maat, 2016). Em locais com acentuadas desigualdades socioespaciais, como se pode encontrar nas grandes cidades do Sul Global (Cavalcante *et al.*

2022), esse método de avaliação pode ser especialmente problemático, pois muitas vezes grupos privilegiados recebem mais benefícios que grupos mais vulneráveis (IPEA, 2020), reforçando ainda mais as desigualdades.

Van Wee e Geurs (2011) defendem que indicadores de acessibilidade são os mais adequados para se medir efeitos distributivos de projetos e políticas de transportes. Essa afirmação é justificada ao se reconhecer a acessibilidade como o principal bem distribuído através desses projetos (Martens; Golub; Robinson, 2012), pois possibilita que indivíduos, de acordo com suas características sociais e espaciais, alcancem as atividades que lhe são necessárias, como educação, saúde e emprego. Além disso, seus indicadores são sensíveis a modificações tanto nos sistemas de transportes como nas características do uso do solo (Pereira; Schwanen; Banister, 2016). Essa perspectiva ressalta tanto a necessidade de se ter a acessibilidade como o centro do planejamento integrado dos subsistemas urbanos, como já se preconiza através do novo paradigma da acessibilidade sustentável (Bertolini; Le Clercq; Kapoen, 2005), quanto a importância de se avaliar como ela é distribuída entre grupos sociais e pelo espaço.

O que pode ser julgado como uma distribuição justa de acessibilidade irá depender dos princípios morais considerados pelos planejadores e tomadores de decisão. Na literatura (Van Wee; Geurs, 2011; Martens; Golub; Robinson, 2012; Lucas; Van Wee; Maat, 2016; Pereira; Schwanen; Banister, 2016) é possível encontrar as teorias do igualitarismo, da justiça de Rawls e do suficientismo como as abordagens mais indicadas em termos de distribuição da acessibilidade.

As teorias do igualitarismo pregam que todas as pessoas deveriam ser tratadas de forma igual. Porém, de acordo com a teoria de justiça de Rawls (2000), que é um tipo de teoria igualitária, isso só é possível se todos possuírem o mesmo nível de acesso aos bens e serviços. Mesmo se admitindo que não é possível uma situação social de total igualdade, o foco das políticas públicas deveriam estar em diminuir as desigualdades. De acordo com Sousa (2019), as desigualdades na acessibilidade são consideradas um problema quando a população mais vulnerável possui o pior nível de acesso às oportunidades, impondo situação de exclusão a esse grupo social (Van Wee; Geurs, 2011). Já na teoria do suficientismo, o foco não é nas desigualdades, mas em um nível mínimo de bem-estar que cada indivíduo deveria possuir (Meyer; Roser, 2009). A ideia é que se estabeleça um parâmetro sob o qual ninguém deveria estar abaixo. Como estabelecer tal parâmetro para nível de acessibilidade urbana ainda é questão de debate (Pereira; Schwanen; Banister, 2016).

Assim, este capítulo busca entender e representar conceitualmente as causas das

desigualdades socioespaciais na acessibilidade e qual sua influência na mobilidade, atendendo ao primeiro objetivo específico desta dissertação. Após a introdução sobre a importância de se investigar as desigualdades na acessibilidade, considerando o objetivo geral do trabalho, a seção 2.2 revisa como a análise da problemática das desigualdades na acessibilidade é incorporada no planejamento urbano integrado. A seção 2.3 apresenta o conhecimento mais atual de como se diagnosticar desigualdades socioespaciais na acessibilidade no nível estratégico do planejamento. A seção 2.4 faz uma revisão das principais hipóteses levantadas a respeito dos determinantes das restrições na acessibilidade que influenciam nas desigualdades socioespaciais. A seção 2.5 debate sobre como a mobilidade é afetada pela acessibilidade e suas restrições. Por fim, o conhecimento obtido nas seções anteriores são utilizados para se construir uma representação conceitual para a problemática das desigualdades na acessibilidade e mobilidade em grandes cidades latino-americanas, descrita na seção 2.6.

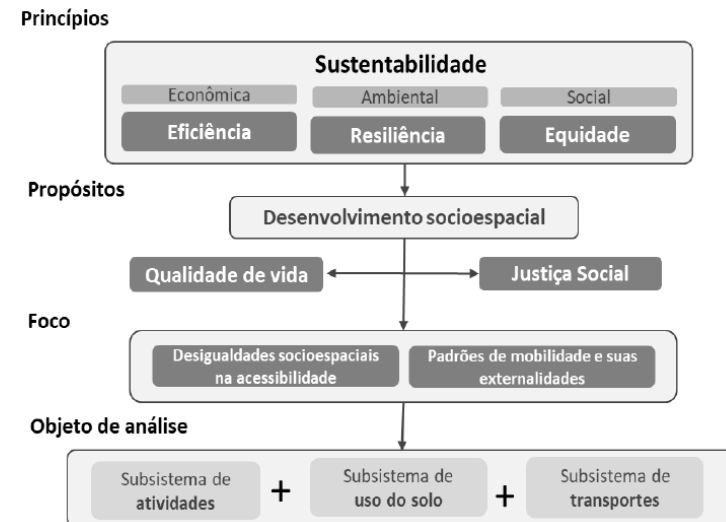
2.2 Planejamento urbano integrado com foco na problemática das desigualdades na acessibilidade e mobilidade

O planejamento tradicional dos transportes, baseado em se prever a demanda e prover a infraestrutura necessária (“prever e prover”), se mostrou ineficiente já na segunda metade do século XX (Owens, 1995). Outras visões passaram então a surgir no meio técnico e acadêmico, como: i) a incorporação de conceitos de sustentabilidade, que junto à ideia de integração com os demais subsistemas urbanos, coloca a acessibilidade como ponto central do planejamento (Bertolini; Le Clercq; Straatemeier, 2008; Banister, 2008); ii) o maior envolvimento dos usuários e demais afetados pelo sistema no processo de planejamento (Willson, 2001); iii) e a mudança do foco da solução para a compreensão dos problemas (Soares; Loureiro; Miller, 2018). Esse novo paradigma de planejamento urbano integrado é sistematizado na Figura 2, sendo interpretado por Cavalcante (2023) como um paradigma de planejamento da acessibilidade e mobilidade na urbe sustentável.

O processo de planejamento deve ser guiado por princípios que busquem o bem-estar da população e abordem questões socialmente relevantes. Esse é o caso da sustentabilidade, que busca pelo desenvolvimento equilibrado de três esferas, a econômica, a ambiental e a social, sendo cada uma associada a um princípio, que são a eficiência, a resiliência e a equidade, respectivamente. O conceito de desenvolvimento sustentável mais conhecido é "aquele que atende às necessidades do presente sem comprometer a possibilidade de as gerações futuras atenderem a suas próprias necessidades" (Brundtland, 1991). Ou seja, o

conceito está ligado à preservação de recursos e da qualidade de vida no futuro, sendo também esse um dos motivos para se planejar.

Figura 2 - Paradigma do planejamento da acessibilidade e mobilidade na urbe sustentável



Fonte: Cavalcante (2023).

Esses princípios devem guiar o planejamento urbano para que se possa chegar aos propósitos de qualidade de vida e justiça social, sendo o foco do planejamento a análise da problemática urbana. De acordo com Soares, Loureiro e Miller (2018), apesar da literatura definir problemas como a diferença entre o estado atual e o desejado de um sistema, entende-se que a ideia de um problema é formada através da percepção dos atores (planejadores, gestores, políticos, usuários e não usuários do sistema), o que envolve diferenças de interesses e uma maior dificuldade em se alcançar um consenso, especialmente no nível estratégico, que envolve a visão da cidade como um todo. Dessa forma, os planejadores devem ser capazes de se embasar nos princípios estabelecidos para guiar os objetivos no nível estratégico, utilizando-os para articular as discussões com os distintos atores em nível tático e operacional.

As teorias de igualdade de Rawls (2000) e do suficientismo, aliadas aos princípios de sustentabilidade, levaram Garcia *et al.* (2018) a elaborarem quatro categorias de problemas de desigualdades na acessibilidade (Figura 3). O Problema Tipo 1 trata da desigualdade entre regiões do território e assume que todos, independentemente da localização, deveriam ter níveis mínimos de acesso às oportunidades; o Problema Tipo 2 trata das desigualdades entre grupos sociais vulneráveis e privilegiados; o Problema Tipo 3 trata das desigualdades entre modos de transportes, buscando manter baixos níveis de impactos ambientais; o Problema Tipo 4 trata das desigualdades entre gerações, considerando que as gerações futuras não

deveriam experienciar níveis de acessibilidade menores que os da geração atual.

Figura 3 - Problemas de desigualdades socioespaciais na acessibilidade urbana



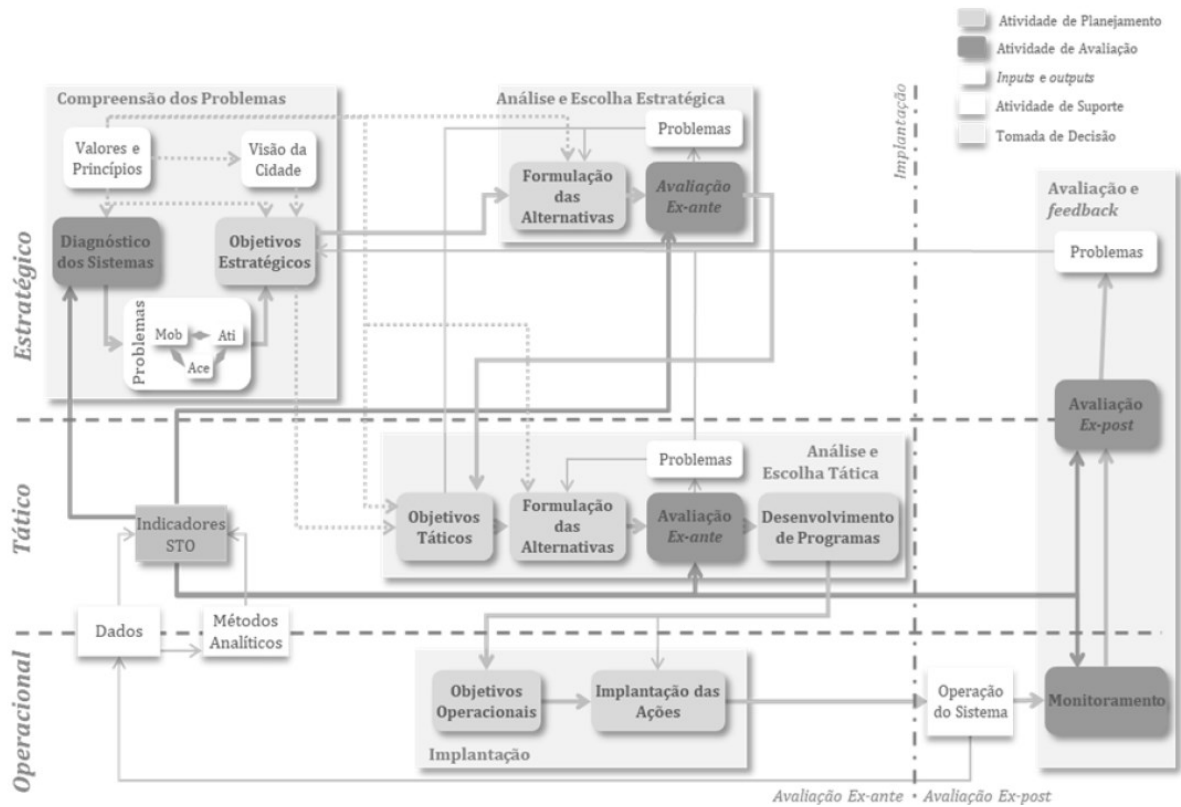
Fonte: Adaptado de Garcia *et al.* (2018).

Buscando suprir as lacunas nas metodologias de planejamento e avaliação da acessibilidade e mobilidade urbanas, Garcia (2016) elaborou uma proposta (Figura 4) orientada à compreensão e avaliação dos problemas, dividida em três níveis de decisão: estratégico, tático e operacional.

O nível estratégico é o momento em que se é decidido o que deve ser feito (Magalhães; Yamashita, 2009). A sua primeira fase se trata da compreensão da problemática, quando é realizada a avaliação diagnóstica da situação atual do sistema urbano. Além disso, os valores e princípios considerados devem ser representados através de indicadores, especialmente os de acessibilidade, que irão guiar não só esta fase, como as subsequentes. Os objetivos, formulados na etapa seguinte, precisam refletir os resultados esperados pelo planejamento e guiar as políticas que buscam mitigar os problemas expostos. A segunda fase do processo ainda se situa no nível estratégico e consiste em se analisar e negociar alternativas de políticas integradas para a problemática urbana, baseadas nos objetivos estratégicos acordados. As alternativas estratégicas encontradas serão avaliadas com base nos indicadores utilizados na caracterização e diagnóstico das desigualdades socioespaciais no acesso às oportunidades de atividades. Por isso, essa avaliação diagnóstica possui importância decisiva nos resultados do planejamento, guiando todas as fases posteriores.

A terceira fase se constitui em detalhar os objetivos táticos e propor e avaliar alternativas de intervenção nos subsistemas urbanos de uso do solo e transportes. A quarta fase ocorre no nível operacional e nela as alternativas selecionadas serão implementadas em cada subsistema. A fase final consiste em avaliar *ex-post* as soluções implementadas, analisando se os objetivos traçados foram alcançados nos níveis estratégicos, tático e operacional do planejamento urbano integrado. Os indicadores novamente possuem um papel importante, pois serão mensurados a partir dos dados do sistema com as intervenções implementadas, contrapondo-as às medidas de desempenho simuladas para um cenário contrafactual.

Figura 4 – Proposta metodológica para o processo de planejamento da mobilidade urbana em um paradigma de planejamento urbano integrado



Fonte: Traduzido de Garcia (2016) por Sousa (2019).

2.3 Diagnóstico estratégico das desigualdades socioespaciais na acessibilidade e decorrentes padrões de mobilidade

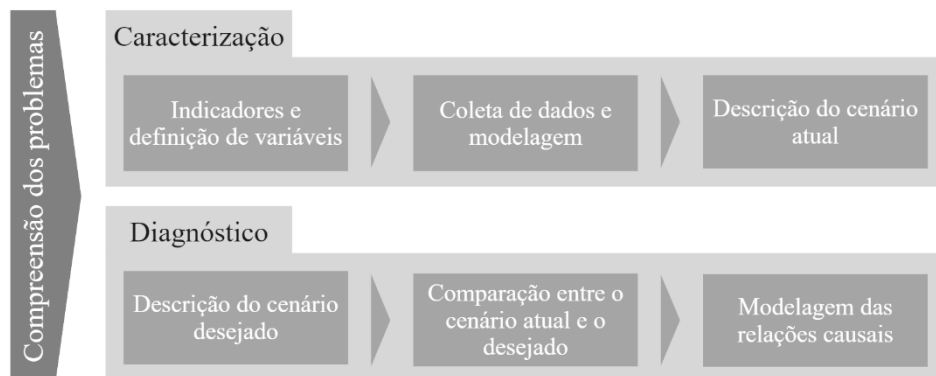
Considerando que os objetivos estratégicos e táticos estabelecidos no planejamento urbano integrado devem buscar mitigar os problemas de desigualdades na acessibilidade e mobilidade, a análise das causas desses problemas antes de se propor

alternativas de solução pode evitar o esforço de se implementar modificações nos subsistemas de uso do solo e transportes que não sejam efetivas (Garcia, 2016). Como visto anteriormente, a investigação das relações de causa-efeito dos problemas na acessibilidade e mobilidade é realizada no nível estratégico. A etapa de análise de problemas (ou avaliação diagnóstica) é recomendada pelo Ministério das Cidades (2020) para a elaboração do plano setorial de mobilidade urbana. Porém, o documento não apresenta detalhes sobre o processo metodológico para se conduzir essa avaliação diagnóstica.

Soares, Loureiro e Miller (2018) apresentam uma proposta metodológica para a compreensão da problemática urbana composta por três etapas: identificação, caracterização e diagnóstico. Na etapa de identificação, que possui o objetivo maior de construir coletivamente as hipóteses de causalidade inerentes à problemática urbana, primeiro se estabelece o contexto da tomada de decisão e se reconhecem os distintos atores envolvidos, cujas percepções sobre os problemas da cidade devem ser consideradas durante todo o processo. Na etapa de caracterização, o objetivo é formular indicadores que permitam mensurar os problemas identificados na etapa anterior e com eles gerar a descrição do cenário atual do sistema urbano. Finalmente, na etapa de diagnóstico os indicadores devem ser modelados para se analisar as relações de causa-efeito e compreender o processo de formação e evolução dos problemas, possibilitando sua hierarquização.

Dada a gravidade da problemática das desigualdades socioespaciais em grandes cidades do Norte e Sul Global, Garcia (2016) propôs uma metodologia para a avaliação diagnóstica de problemas de desigualdades na acessibilidade e mobilidade urbana (Figura 5). Mais especificamente, a autora abordou a distribuição dos problemas de desigualdade na acessibilidade sobre o espaço, entre grupos sociais e entre gerações presente e futura, como proposto na tipologia de problemas representada na Figura 3.

Figura 5 – Metodologia de avaliação diagnóstica dos problemas de desigualdades na acessibilidade e mobilidade urbana



Fonte: Traduzido de Garcia (2016).

Conforme sistematizado na Figura 5, a proposta metodológica de Garcia (2016) possui duas etapas: caracterização e diagnóstico. A etapa de caracterização, que tem como objetivo gerar um quadro com a situação atual do sistema urbano, inicia com a escolha de indicadores para representar tanto a acessibilidade e a mobilidade, quanto as causas de seus problemas. O próximo passo é a coleta e modelagem dos dados para gerar os indicadores. A coleta pode ser feita diretamente de bases de dados dos subsistemas de transportes e uso do solo, bem como de dados socioeconômicos, como o censo demográfico. Na falta de dados ou quando alguma base está desatualizada, pode ser realizada uma modelagem, tanto na forma tradicional quanto integrada, utilizando-se modelos LUTI. A última atividade dessa etapa é a avaliação do cenário atual do sistema urbano através de uma análise exploratória, utilizando os indicadores estabelecidos e a aplicação de ferramentas estatísticas não espaciais (média, mediana, box plot) e espaciais (índice de Moran, mapas LISA).

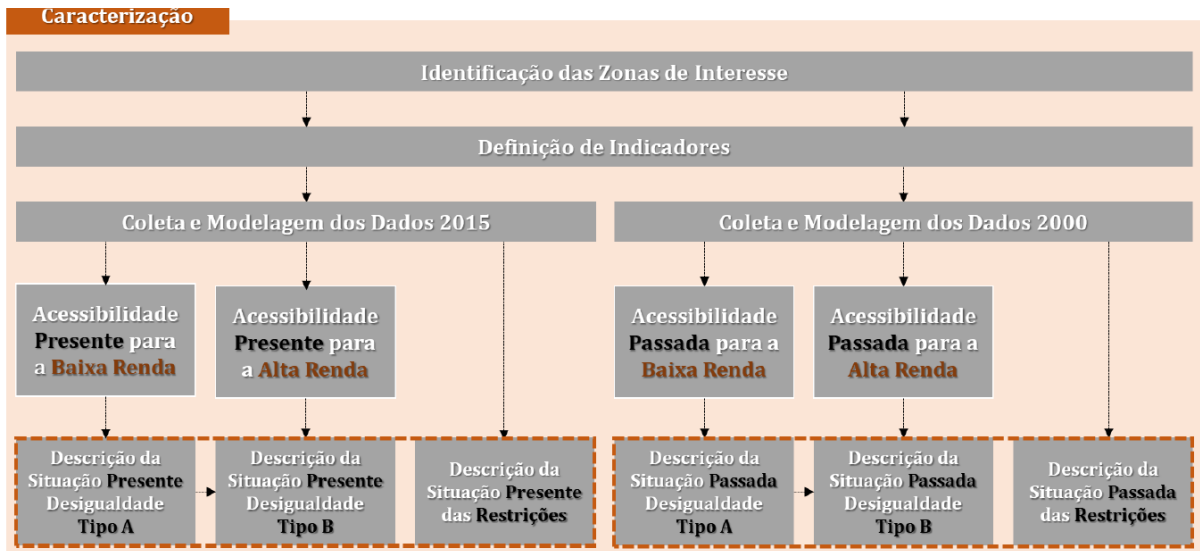
Já na etapa de diagnóstico, o objetivo é avaliar os problemas e suas causas e efeitos. O primeiro passo é estabelecer valores de referência para os indicadores de acessibilidade e mobilidade que representem a expectativa dos usuários do sistema urbano. Esses valores serão comparados com os valores mensurados para os indicadores que representam o estado atual do sistema, possibilitando a identificação de áreas problemáticas. Porém, não existem critérios claros que apontem qual o limite a partir do qual um valor de acessibilidade ou mobilidade é aceitável. O passo seguinte é a análise das relações causais de acordo com hipóteses a serem formuladas. Para o problema de desigualdades sobre o espaço, devem ser mensuradas correlações e calibrados modelos de regressão, espaciais e não espaciais, que estabeleçam tanto a relação de dependência quanto a intensidade entre os

indicadores de acordo com as hipóteses idealizadas. Garcia (2016) propõe estimar a correlação entre os indicadores que representam características dos subsistemas urbanos (uso do solo e transportes) e os indicadores de acessibilidade e mobilidade. Já para o problema de desigualdades entre classes sociais, a análise é realizada através de correlação local, com a utilização de mapas LISA para cada par indicadores de causa e efeito de acordo com as hipóteses.

De modo semelhante, Sousa (2019) propôs um método de diagnóstico estratégico da acessibilidade urbana dividido também nas etapas de caracterização e diagnóstico. O autor não avaliou os efeitos sobre a mobilidade. Parte-se da premissa de que os problemas nos níveis de acessibilidade e suas desigualdades decorrem de ineficiências no subsistema de transportes e de inadequações na distribuição de usos do solo, e ainda que as percepções são diferentes de acordo com o nível socioeconômico dos indivíduos. Dessa forma, para que a análise seja baseada na justiça distributiva, todo o processo é focado em dois grupos divididos pela condição socioeconômica: o vulnerável e o privilegiado. Para investigar a evolução da problemática no tempo, ambas as etapas também contam com dois momentos: a avaliação da acessibilidade e suas desigualdades no passado e no presente. Assim, analisam-se os efeitos das desigualdades atuais nos níveis de acessibilidade das gerações futuras, incorporando-se o princípio da sustentabilidade entre gerações.

Na caracterização (Figura 6), é realizada uma análise exploratória, mensurando-se os níveis de acessibilidade e suas restrições, tanto espacialmente quanto temporalmente. Essa análise permite estabelecer um recorte da situação para os dois grupos no passado e presente, possibilitando levantar hipóteses sobre como a acessibilidade se forma e se modifica. Em seguida, utilizam-se os indicadores para avaliar a intensidade da diferença na acessibilidade entre os grupos sociais.

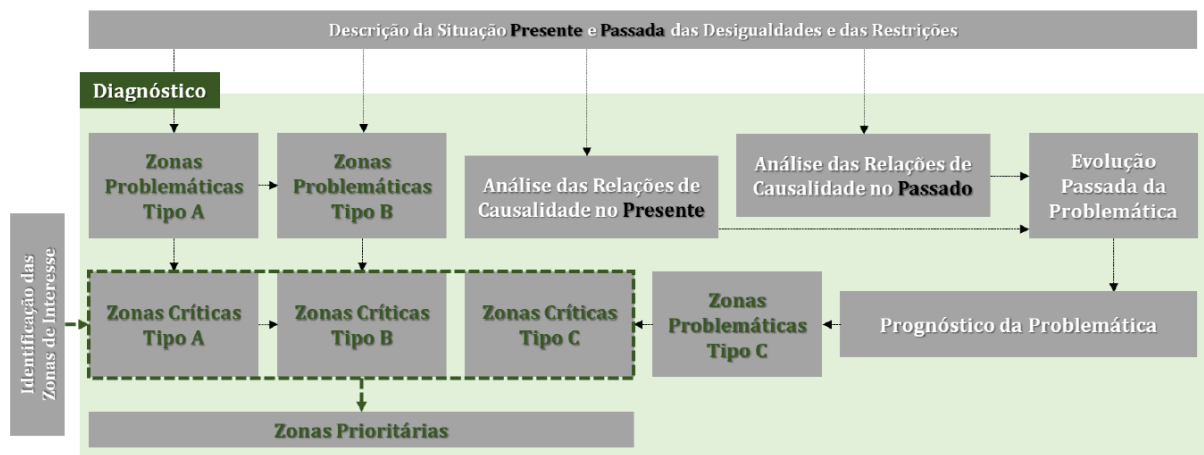
Figura 6 - Método de caracterização da problemática das desigualdades na acessibilidade



Fonte: Sousa (2019).

No diagnóstico (Figura 7), primeiramente se avalia o quanto as restrições, representadas através de indicadores do uso do solo e de transportes, afetam nos níveis de acessibilidade. Para isso, é mensurada a correlação espacial entre os indicadores da acessibilidade e suas restrições através de mapas bi-lisa cluster e índices de Moran, além de serem calibrados modelos geponderados para identificar a intensidade do efeito de cada restrição sobre a acessibilidade em cada região de análise, comparando-se os coeficientes normalizados. Logo após, é realizado o prognóstico da evolução da problemática, projetando-se um cenário futuro através de tendências evolutivas. O autor realizou a simulação através da calibração dos modelos do TRANUS para o cenário passado e presente, utilizando cenários de intervenção de acordo com políticas e intervenções previstas nos planos diretor e de mobilidade da cidade.

Figura 7 - Método de diagnóstico da problemática das desigualdades na acessibilidade

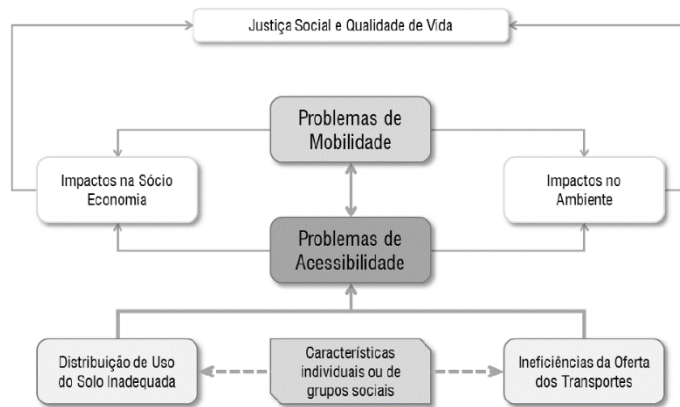


Fonte: Sousa (2019).

2.4 Causas das desigualdades socioespaciais na acessibilidade urbana

De acordo com Garcia *et al.* (2018), os problemas na acessibilidade são causados pelos problemas nos subsistemas urbanos. Esses problemas são devido às distribuições inadequadas do solo e às ineficiências nos transportes, além das características dos indivíduos ou grupos sociais, como ilustrado na Figura 8. Compreender quais são os motivos que levam às desigualdades na acessibilidade requer entender quais são os fatores (restrições) dos subsistemas que possuem influência na acessibilidade e quais são as formas (ou problemas) que esses fatores podem assumir que geram as desigualdades.

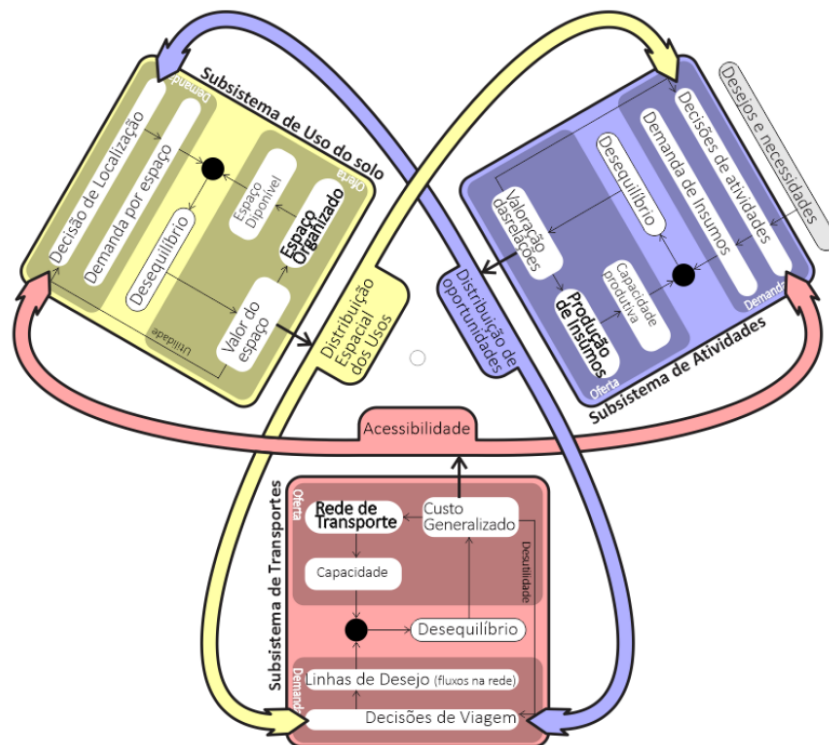
Figura 8 - Representação da problemática da acessibilidade e mobilidade urbana



Fonte: Traduzido de Garcia *et al.* (2018) por Sousa (2019).

Lopes (2015) distingue três subsistemas urbanos, cada um contando com seu próprio funcionamento interno, como ilustrado na Figura 9. Tem-se como premissa que as viagens são derivadas da necessidade que as pessoas possuem em se engajar em atividades (trabalhar, comprar, estudar, entre outros), ou seja, as viagens são motivadas pelas atividades, que estão distribuídas no espaço. Tomar a decisão de se engajar em atividades difere do processo de tomar a decisão de viajar e de onde se localizar. Por exemplo, a escolha de trabalhar ou não, é diferente da decisão de onde aceitar o emprego e de que horas sair para o trabalho. Todos os três subsistemas urbanos possuem uma relação interna de demanda e oferta cujo desequilíbrio gera custos que possuem efeitos tanto internos quanto nos demais subsistemas. Os elementos que fazem a interrelação entre os subsistemas afetam as decisões de deslocamento, sendo chamadas de medidas de impacto. As intra e inter-relações que ocorrem devido aos desequilíbrios nos subsistemas estão resumidas no Quadro 1.

Figura 9 – Representação conceitual dos subsistemas urbanos de atividades, uso do solo e transportes



Fonte: Lopes (2015).

As restrições internas do subsistema de atividades (SA) podem ser devido à limitação dos recursos no mercado, como, por exemplo, número de vagas de empregos ou ao tempo em que as atividades ficam disponíveis. Ou seja, a oferta é formada pela disponibilização de bens, serviços e empregos pelo mercado, e a demanda pelos indivíduos que buscam esse consumo. O desequilíbrio gera flutuação nos preços dos bens e serviços e nos salários ofertados. Como impacto, pode haver alterações na renda e consumo das famílias.

O subsistema de uso do solo (SUS) é intrinsecamente espacial, assim como as decisões locacionais relacionadas a ele. Está associado com a forma com que os usos se distribuem no espaço. A demanda é composta pelas decisões das pessoas em se localizar (para residir ou comercializar, por exemplo) e a oferta, pela disponibilidade de espaço. A concretização do desejo das pessoas é o que forma o SUS, que pode ser mensurado através de variáveis como densidade de residências, comércio ou população, mix de usos e diversidade de atividades. As restrições internas são relativas ao valor dos terrenos, disponibilidade de espaço para novas construções, regulamentações, entre outros. O desequilíbrio gera flutuações no preço dos terrenos, podendo gerar déficit habitacional e áreas subutilizadas, o que impacta nas densidades e diversidade de usos do solo.

Quadro 1 – Impacto dos desequilíbrios nos subsistemas urbanos de atividades, uso do solo e transportes

	Intrarrelações	Inter-relações	
Subsistema de Atividades (SA)	<p>Causa: Escassez ou excesso de empregos / produtos ou serviços</p> <p>Desequilíbrio: Desemprego / flutuações de salários e de preços / planejamento familiar</p> <p>Efeito: Mudanças nos níveis de renda / no tamanho da família / nos níveis de consumo (CAMPOS; REGGIO, 2015).</p>	Mudanças nos níveis de renda / no tamanho da família / nos níveis de consumo afetam as decisões do SUS modificando as localizações residenciais (PRASHKER; SHIFTAN; HERSHKOVITCH-SARUSI, 2008) ou comerciais / o valor do solo.	Mudanças nos níveis de renda / no tamanho da família / nos níveis de consumo afetam as decisões do ST modificando os destinos, os modos (PIKE; LUBELL, 2016), o encadeamento (MANOJ; VERMA, 2015) e a quantidade das viagens (ORDERA <i>et al.</i> 2015).
Subsistema de Uso do Solo (SUS)	<p>Causa: Escassez ou excesso do estoque de solo / floorspace</p> <p>Desequilíbrio: Flutuações nos preços dos imóveis / déficit habitacional</p> <p>Efeito: Mudanças nas densidades (FESSELMAYER; SEAH, 2018) / no mix de usos.</p>	Mudanças nas densidades / no mix de usos afetam as decisões do SA modificando o engajamento em atividades (REED; UME, 2016) / a criação de empregos (BAUMGARTNER <i>et al.</i> 2015) / os níveis de produtividade.	Mudanças nas densidades / no mix de usos afetam as decisões do ST modificando os destinos (JIANG <i>et al.</i> 2017), os modos (MUNSHI, 2016), o encadeamento e a quantidade das viagens.
Subsistema de Transportes (ST)	<p>Causa: Escassez ou excesso de capacidade da rede de transporte</p> <p>Desequilíbrio: Congestionamento / acidentes / emissões</p> <p>Efeito: Mudanças nos níveis de acessibilidade infraestrutural e mobilidade (LEVINE; MERLIN; GRENGS, 2017).</p>	Mudanças nos níveis de acessibilidade infraestrutural e mobilidade afetam as decisões do SA modificando o engajamento em atividades (ŠT'ASTNÁ; VAISHAR; STONAWSKÁ, 2015) / a criação de empregos (FAGEDA; GONZALEZ-AREGALL, 2017; JIN; RAFFERTY, 2017) / os níveis de produtividade.	Mudanças nos níveis de acessibilidade infraestrutural e mobilidade afetam as decisões do SUS modificando as localizações residenciais (PAPA; BERTOLINI, 2015) ou comerciais (MEJIA-DORANTES; PAEZ; VASSALLO, 2012) / o valor do solo (BANISTER; THURSTAIN-GOODWIN, 2011).

Fonte: Sousa (2019).

A oferta do subsistema de transportes (ST) é formada pelos meios de transporte disponíveis e a infraestrutura (incluindo regras como limites de velocidade ou frequência do transporte público), enquanto a demanda é formada a partir da decisão dos indivíduos em se deslocar. Os desequilíbrios podem ser entendidos como uma medida do desempenho da rede, gerando o que se chama de custo generalizado, medidos por custos monetário, de tempo, conforto, entre outros.

Como apontado pela representação da problemática da acessibilidade e mobilidade urbana, os problemas nos três subsistemas são as causas dos problemas de acessibilidade. O conceito de acessibilidade auxilia no entendimento de como é sua relação com esses três subsistemas urbanos. Geurs e van Wee (2004) definem acessibilidade de passageiros como o potencial, propiciado pelos sistemas de transportes e de uso do solo, que indivíduos possuem de alcançarem atividades ou destinos através de uma combinação de modos. A partir dessa definição, os autores listam quatro componentes que formam a

acessibilidade:

a) componente do uso do solo, que reflete as características do solo ocupado, sintetizadas pela qualidade e distribuição das oportunidades ofertadas, bem como pela demanda e competição por essas atividades;

b) componente dos transportes, que reflete a desutilidade para um indivíduo ir de uma origem para um destino, o que pode ser representado pelo tempo, custos e esforços empreendidos ao se utilizar a infraestrutura de transportes, sendo também afetado pela interação entre demanda e oferta;

c) componente temporal, que representa o tempo disponível para os indivíduos participarem das atividades durante o dia;

d) o componente individual exprime as características do indivíduo (como idade, renda, nível educacional, condição física) que influenciam tanto o acesso aos modos quanto a distribuição de oportunidades que estão disponíveis para eles (por exemplo, poder dirigir ou possuir o nível educacional necessário para um tipo de trabalho).

As medidas de impacto e os componentes da acessibilidade estão relacionados, pois são indicadores das restrições ao acesso impostas pelos subsistemas. Os componentes do uso do solo e de transportes estão associados aos subsistemas de mesmo nome. Já os componentes temporal e individual estão associados ao subsistema de atividades. Geurs e Van Wee (2004) afirmam que um indicador de acessibilidade ideal deveria conter todos os componentes da acessibilidade, mas reconhecem que essa tarefa poderia torná-lo demasiadamente complicado ou mesmo impossível de calcular. A escolha deve ser feita de acordo com o propósito da análise.

Existe uma complexa série de efeitos diretos e indiretos entre as características (ou problemas) do uso do solo, do sistema de transportes e dos indivíduos e as desigualdades na acessibilidade. Caso essas relações sejam ignoradas, pode haver vieses sobre os resultados, sendo esse um dos motivos em se encontrar pesquisas com divergentes conclusões (Van Wee; Annema; Banister, 2013). A seguir é descrito como as características dos subsistemas de uso do solo (2.4.1) e de transportes (2.4.2), bem como as restrições dos indivíduos (2.4.3), destacando-se o aspecto socioeconômico, podem afetar nas desigualdades na acessibilidade.

2.4.1 Efeitos das características do uso do solo sobre as desigualdades na acessibilidade

As características do ambiente construído mais estudadas por terem impacto sobre as viagens são densidade, diversidade, design, acessibilidade e a distância até um ponto de

transporte público (Ewing; Cervero, 2010). Mas não só a mensuração dessas características em uma zona é relevante, como também a interação espacial entre as áreas. Existem efeitos atribuídos à distribuição das atividades pelo espaço. Por exemplo, o nível de densidade possui influência sobre a acessibilidade, apesar da consideração do que é uma densidade alta ou baixa ainda ser tema de debate (Van Wee; Annema; Banister, 2013). Mas a concentração das atividades pelo espaço, ou seja, a diferença de densidade entre as regiões, possui efeito na acessibilidade e no comportamento de viagem, como descrito adiante.

O desenvolvimento policêntrico é apontado como mais eficiente do que áreas compactadas e centralizadas, pois diminuem as distâncias de deslocamento (Ewing, 2008). Os problemas no modelo de cidade monocêntrica podem ser agravados devido ao baixo mix de usos nas regiões centrais. Pesquisas em áreas metropolitanas indicam que restrições nas leis de zoneamento que dificultam o crescimento na oferta de residências nos centros urbanos são responsáveis por aumentar o preço da habitação nessas regiões (Hsieh; Moretti, 2019), já que há alta demanda para os locais mais próximos aos empregos e oferta limitada. Como consequência, ocorre a segregação dos trabalhadores de baixa renda em áreas mais distantes das oportunidades. Esse problema pode gerar o chamado *spatial mismatch*, que é entendido como as barreiras geográficas, dentro do ambiente urbano, entre os empregos e os domicílios ofertados para um certo grupo social (Preston; Mclafferty, 1999), geralmente em situação de vulnerabilidade. Duque *et al.* (2019) realizaram um estudo em cidades Latino-Americanas, mostrando uma correlação positiva entre densidade e níveis de produtividade. Porém, os autores alertam que a performance econômica só ocorre quando a alta densidade é aliada à conectividade. Ou seja, uma alta concentração de residências sem ligação com as atividades vai gerar baixo desempenho produtivo, o que leva os indivíduos de baixa renda a uma situação de vulnerabilidade.

O *spatial mismatch* da população de baixa renda, somado à autosegregação da alta renda, frequentemente é acompanhado do espraiamento urbano, outro problema recorrente nas grandes cidades. Espraiamento urbano pode ser definido como um padrão em que o solo é ocupado de forma dispersa e não compacta. É um fenômeno altamente associado à baixa acessibilidade, o que pode ser resultado da incapacidade em se alcançar uma boa diversidade no uso do solo. Esse cenário gera uma dependência com o veículo privado, sendo uma barreira ainda pior para aqueles que não podem dirigir, gerando uma desigualdade na acessibilidade entre indivíduos de acordo com a idade, sexo e renda (Ewing, 2008). Existem evidências que regiões com alta densidade populacional aumentam a eficiência do transporte público (Mattioli *et al.* 2020). Porém, uma área residencial compacta, mas cercada por áreas

sem oportunidades terá acessibilidade menor do que uma outra área residencial com baixa densidade, mas cercada por áreas com oportunidades. O contexto espacial onde essa área está inserida tem assim papel importante na sua acessibilidade.

2.4.2 Efeitos das características dos transportes sobre as desigualdades na acessibilidade

Até os dias atuais, existem políticas que buscam solucionar os problemas na mobilidade através de modificações apenas na oferta de transportes, especialmente o motorizado individual. Há muito tempo foi verificada a ineficiência em se aumentar a capacidade da malha viária para se resolver os problemas de congestionamento em grandes cidades. Ao se aumentar a oferta de infraestrutura para automóveis, não só a demanda também pode aumentar (Demirela *et al.* 2008), até chegar novamente no ponto de congestionamento, como ainda pode, para alguns casos, ser pior do que antes da mudança (Downs, 1962). A teoria por trás desse processo, chamada de demanda induzida, explica que reduzir o tempo de viagem, aumentando a oferta, atrai mais viagens por esse modo. Motoristas que utilizavam outras rotas passam a usar a via com melhor tempo de viagem e indivíduos que utilizavam o modo coletivo podem passar para o privado para aproveitar a nova vantagem (Boarnet; Chalermpong, 2001).

A outra consequência da demanda induzida é que novas infraestruturas geram atração de residências para as áreas beneficiadas, elevando o volume de tráfego na via. Esse efeito geralmente é observado em zonas urbanas em que existe uma diferença substancial nas características da malha viária. Quando a cidade possui uma infraestrutura uniforme por todo o território, esse efeito não é significativo (Boarnet; Chalermpong, 2001). Assim, a infraestrutura de transportes causa impacto na acessibilidade tanto de forma direta, quanto indireta, através das características do uso do solo. Além do efeito de atrair novas construções, de acordo com a teoria da economia urbana, a melhoria na malha viária promove uma modificação no uso do solo através do preço do solo. Maior capacidade leva a um preço do solo mais elevado, pois existem pessoas dispostas a pagar mais para obter essas melhorias (Boarnet; Chalermpong, 2001).

O investimento em infraestrutura para transporte motorizado pode ser incentivado mais por discurso político do que por evidências, como por exemplo, o argumento de que mais infraestrutura gera mais empregos (Mattioli *et al.* 2020). A relação entre infraestrutura de transportes e geração de empregos é, no mínimo, complexa. Além de atrair domicílios, novas infraestruturas podem atrair postos de empregos. Porém, esses postos não são necessariamente

novos, sendo muitas vezes ser realocados de outros locais. Ao longo prazo, a realocação de empregos e domicílios também gera uma demanda por mais infraestrutura (Jiwattanakulpaisarn; Noland; Graham, 2010). Além disso, infraestrutura de transporte viário demanda terreno, o que compete com a demanda por áreas para construção de habitação e comércio (Liu; Guan, 2005). Esse confronto pode ser particularmente problemático em áreas urbanas já bem desenvolvidas, pois pode entrar em conflito com construções já existentes (Mattioli *et al.* 2020), levando a desapropriação de domicílios e afastamento da população das áreas com crescente oferta de serviços.

A oferta de serviços e infraestrutura de transporte público é apontada como uma forma para se melhorar a acessibilidade urbana (Merlin; Singer; Levine, 2021). Apesar disso, Boisjoly *et al.* (2020) mostraram que áreas periféricas que possuem os mesmos níveis de infraestrutura de BRT que áreas de centrais, ainda possuem menor acessibilidade. Isso porque os empregos estão concentrados nos centros. Dessa forma, a construção de infraestrutura não seria o suficiente para diminuir as desigualdades, dado que os empregos ainda estariam longe das periferias.

2.4.3 Efeitos das restrições dos indivíduos sobre as desigualdades na acessibilidade

Os problemas derivados dos subsistemas de atividades, uso do solo e transportes são sentidos de forma diferente por diferentes grupos sociais (Manoj; Verma, 2015). Para o grupo de alta renda, adquirir uma residência próxima aos empregos ou utilizar apenas veículo individual em seus deslocamentos pode não ser um problema para ter acesso a trabalho, ao passo que para grupos de baixa renda essas podem ser barreiras que diminuem, ou mesmo impedem, seu acesso aos empregos. O aumento dos aluguéis, fortalecido pela construção de novas infraestruturas de transportes, força moradores de menor renda a se mudarem para regiões mais afastadas. Esse processo gera a chamada gentrificação, que atualmente ocorre especialmente em cidades de países em desenvolvimento (Jones; Lucas, 2012; López-Morales; Shin; Lees, 2016), reforçando a segregação da população mais vulnerável. Em cidades do Sul Global, uma distribuição uniforme da população, evitando a segregação de grupos sociais, foi associada a melhores níveis econômicos (Duque *et al.* 2019). Assim, existem vieses causados pelas diferenças socioeconômicas. Por exemplo, pessoas de alta renda, que realizam mais viagens, podem pagar por residências com grandes áreas em locais pouco densos. O impacto da densidade sobre as viagens seria superestimado se não fossem consideradas as diferenças de renda (Van Wee; Annema; Banister, 2013).

Deve-se levar em consideração que pessoas com os mesmos níveis socioeconômicos e vivendo em bairros com as mesmas características demográficas podem variar de comportamento devido a suas atitudes, preferências e estilo de vida (Van Wee; Annema; Banister, 2013). Além disso, existe a questão do viés de seleção residencial. As pessoas podem escolher seus locais de residência de acordo com suas preferências por certos modos de transporte, ou adaptarem o modo de deslocamento de acordo com o ambiente. Estudos empíricos mostram que o ambiente construído possui influência sobre o comportamento de viagem, mesmo quando controlado pelas preferências dos usuários (Næss, 2009). Mais ainda, Næss (2009) argumenta que os indivíduos só podem escolher os modos que preferem se o ambiente que lhes permitem exercer esse comportamento estiver disponível. Além de estar disponível, essas áreas também precisam ser acessíveis para as pessoas de todos os níveis de renda.

2.5 Determinantes dos padrões de mobilidade urbana

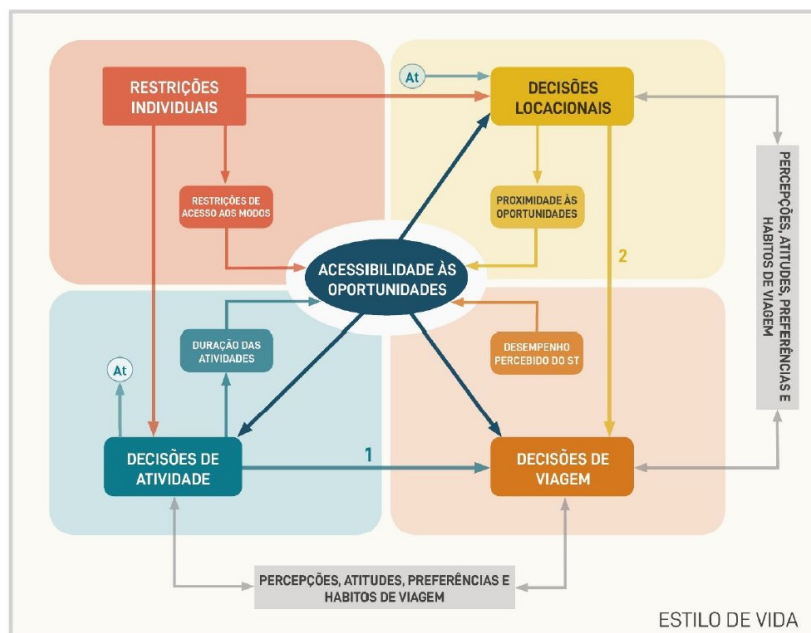
Enquanto a acessibilidade pode ser entendida como o potencial para se alcançar atividades, a mobilidade é expressa através das características das viagens efetivamente realizadas. O grande número de viagens realizadas nas grandes cidades, associadas às grandes distâncias, provocam uma série de consequências na qualidade de vida urbana, podendo-se citar o congestionamento, poluição do ar, acidentes, barulho, uso de energia não renovável e produção de resíduos (Bertolini; Le Clercq; Straatemeier, 2008). A maioria das políticas para melhorar a mobilidade urbana busca aumentar a velocidade nas viagens através de investimentos na infraestrutura para o tráfego de veículos, gerando maior uso de transporte motorizado e, conseqüentemente, aumento das externalidades negativas. A mobilidade sustentável deve reverter esse quadro, buscando maior eficiência no subsistema de transportes, diminuição da quantidade e distância das viagens, assim como incentivar uma mudança para modos de transporte ativos e coletivo (Banister, 2008).

Os padrões de mobilidade são formados a partir das decisões de viagem realizadas pelos indivíduos, podendo-se citar como as principais escolhas: a realização (ou não) da viagem, o destino, o horário, o modo e a rota. De acordo com Ben-Akiva e Lerman (1985), tradicionalmente, as decisões de viagem ao nível do indivíduo são modeladas através da teoria da escolha discreta e o princípio da maximização da utilidade. Em resumo, os indivíduos são confrontados com um certo conjunto de alternativas, sendo a alternativa com maior probabilidade de ser escolhida aquela que apresenta a maior utilidade (ou atratividade).

Assim, o tomador de decisão deve ponderar entre os benefícios e os custos gerados em se realizar a viagem.

O nível de atratividade de uma atividade varia de acordo com sua localização e as necessidades e preferências dos indivíduos. Por outro lado, as restrições para a realização das viagens podem estar ligadas às características do indivíduo (idade, limitações físicas, condições socioeconômicas), às barreiras no ambiente construído (distância até as atividades, segurança, conforto) e às limitações do subsistema de transportes (meios de transporte disponíveis, tempo de viagem). Baseando-se nessa teoria, Siqueira (2020) elaborou uma representação conceitual dos determinantes das decisões de viagens, apresentada na Figura 10. O autor considerou a influência dos três subsistemas urbanos, além de um quarto fator, as restrições individuais. Cada uma dessas partes gera um componente da acessibilidade, que também tem seu impacto sobre as decisões de viagem. O entendimento da demanda por transportes através da análise das decisões de viagem ocorre ao nível do indivíduo, ou escala microscópica. A agregação das viagens individuais forma os fluxos de viagens, resultando no comportamento médio dos indivíduos, que é uma representação da demanda em escala macroscópica (Cascetta, 2009), devendo existir compatibilidade entre as duas representações. São os fluxos de viagem que irão carregar as redes e causar os impactos sobre o ambiente urbano. Ou seja, é a agregação das escolhas individuais que impactam, por exemplo, nos níveis de congestionamento e poluição do ar.

Figura 10 - Representação conceitual simplificada dos determinantes das decisões de viagem



Fonte: Siqueira (2020).

As restrições individuais são formadas por elementos que atuam diretamente sobre as decisões de atividades e localização, e indiretamente sobre todas as decisões através de um dos componentes da acessibilidade, formado pelas restrições de acesso aos modos. A condição socioeconômica pode limitar o acesso do indivíduo à certas atividades (ex.: faculdades particulares) e restringir tanto suas possibilidades de moradia, quanto o acesso aos modos. Estudos apontam que a quantidade de viagens e a escolha pelo modo é mais afetada pela condição socioeconômica dos indivíduos do que pelo ambiente construído (Ewing; Cervero, 2010; Van Acker; Witlox; Van Wee, 2007). Independentemente da quantidade de empregos próximos ou da infraestrutura de transportes disponível, pessoas de alta renda tendem a utilizar mais automóveis, enquanto as de baixa renda utilizam mais transporte público devido a restrições orçamentárias (Shi *et al.* 2022).

As decisões de atividades decorrem da influência de três variáveis: as necessidades e desejos dos indivíduos, as restrições individuais e a distribuição de oportunidades (ou cenário socioeconômico da cidade). Essas decisões são consideradas como o motivo de haver deslocamento, por isso, afetam diretamente nas decisões de viagens. As decisões de atividades ligadas à vida profissional e às atribuições do lar são consideradas prioridades em relação às demais, e influenciam diretamente nas decisões de localização, como onde trabalhar ou estudar.

As decisões locacionais são realizadas a partir da consideração das decisões de atividade, de acordo com as restrições individuais e pela distribuição espacial dos usos. Este grupo de decisões afeta as decisões de viagem direta e indiretamente. Devido às limitações econômicas, as decisões locacionais decorrem de um balaço entre os atributos da moradia (e seu entorno) e o acesso às oportunidades de atividades. As decisões de onde estudar e trabalhar são responsáveis pelo impacto direto nas decisões de viagens, pois são consideradas decisões compulsórias e determinam o destino das viagens. A agregação das decisões locacionais forma as características de uso do solo da zona. Estudos sobre a associação entre as características do uso do solo e a redução do uso de automóvel são conduzidas desde a década de 1970, havendo variedade nos resultados, muitas vezes conflitantes. Apesar disso, há indícios de que o uso do solo exerce influência nas decisões de viagem (Handy; Cao; Mokhtarian, 2005). De acordo com Ewing e Cervero (2010) essa influência aparece de forma indireta e bastante significativa através da acessibilidade, como também de forma direta, através das densidades e distâncias até o centro da cidade, sendo o VMT (*vehicle miles traveled*) a característica da mobilidade mais afetada.

A configuração da infraestrutura de transportes dita a capacidade desse subsistema, que quando está sob a pressão exercida pelo fluxo nas redes, forma os congestionamentos. A percepção das impedâncias que os usuários possuem sobre essa configuração, que pode ser mensurada pelo valor do tempo ou pelo valor monetário, resulta no desempenho percebido do subsistema de transportes (ou seu custo generalizado), que é o componente infraestrutural da acessibilidade. Quando a infraestrutura de transportes é distribuída de forma desigual no espaço, os locais mais longes dos centros costumam ser aqueles com os piores níveis de infraestrutura, aumentando os tempos de viagem nessas regiões (Gao *et al.* 2022). A priorização da malha viária melhora a acessibilidade por transporte motorizado individual, fazendo com que mais oportunidades estejam disponíveis em um menor tempo, quando comparado com o transporte coletivo.

Assim, a população de baixa renda está em desvantagem por estarem predominantemente localizadas longe dos empregos, em regiões que possuem os piores níveis de infraestrutura de transporte e por serem as principais usuárias do sistema de transporte público. Existe também uma importância sobre o ponto de início e fim de uma viagem: mesmo que exista transporte público na zona, para ser um modo atrativo, as linhas precisam fazer a interligação com zonas que possuem atividades de interesse dos usuários (Cervero; Duncan, 2006).

Assim, a acessibilidade, formada pelos seus quatro componentes, adquire um atributo espaço-temporal. Parte-se da ideia de que cada indivíduo possui uma certa quantidade de tempo que reserva à realização dos deslocamentos, e que faz ajustes para preservar esse orçamento de tempo. Dessa forma, um aumento nas densidades ou diversidade de uso do solo pode reduzir os tempos de deslocamento, que estimula maior mobilidade (realização de mais atividades) ou utilização de modos ativos e transporte público (modos mais lentos). Já a melhoria na infraestrutura de transportes, que também diminui a quantidade de tempo de deslocamento, tende a aumentar a quantidade ou as distâncias de viagem (realizar atividades mais distantes ou se localizar mais distante das atividades). A teoria de que as pessoas mantêm um orçamento de tempo de viagens constante poderia justificar a divergência entre os resultados dos estudos que investigam os impactos do ambiente construído sobre a mobilidade (Van Wee; Annema; Banister, 2013). Ao se reduzir as resistências aos deslocamentos, também se reduz o tempo de viagem. Dessa forma, ao invés de usar esse tempo “extra” para outras atividades que não se deslocar, os indivíduos podem escolher uma residência mais longe de seu emprego, mas com melhor qualidade, ou escolher um emprego mais distante, mas que pague melhor. A partir dessa lógica, a facilidade (ou dificuldade) gerada pela acessibilidade possui um efeito sobre os padrões de

mobilidade observados.

Quando há uma mudança nos determinantes dos padrões de viagem, o comportamento dos indivíduos não muda instantaneamente, podendo levar anos para que esses impactos sejam completamente materializados (Van Wee; Annema; Banister, 2013). Por exemplo, dada uma via congestionada, ao se aumentar sua capacidade, há um alívio no fluxo, melhorando-se os tempos de viagem nesse trecho. Indivíduos que anteriormente não utilizavam a via, visando as vantagens desse fluxo de veículos mais rápido, passam a utilizá-la, aumentando a demanda. Com o passar do tempo, mais veículos são adicionados nesse trecho, até o possível alcance da capacidade máxima, onde haverá novamente a formação de congestionamento. Assim, o tempo de modificação da via gera influência nos dados observados, já que uma via com a mesma capacidade pode gerar diferentes fluxos ao longo do tempo.

Dessa forma, supõe-se que mesmo quando apresentam níveis semelhantes de acessibilidade, locais mais afastados dos centros podem apresentar maior distância média percorrida do que aqueles mais próximos aos centros. Isso pode ocorrer pois mais e melhores oportunidades podem ser encontradas nos centros, sendo mais atrativas do que as oportunidades mais próximas. Além disso, a acessibilidade por modo motorizado individual pode ser bastante semelhante de uma zona para outra, já que pode alcançar grandes velocidades. Essa premissa é especialmente válida quando se utiliza um indicador de acessibilidade que não inclui a competição pelas atividades.

A mobilidade já é vista como mais do que um privilégio, sendo entendida como uma necessidade para a participação dos indivíduos na sociedade (Kenyon, 2003). Baixa acessibilidade a áreas onde se localizam empregos, hospitais, escolas e equipamentos de lazer é responsável pela decisão de não acessar esses equipamentos, especialmente por indivíduos com baixo poder aquisitivo, menores de idade e famílias que não possuem carro, tendo como consequência a exclusão social (Social Exclusion Unit, 2003).

2.6 Representação conceitual dos determinantes das desigualdades na acessibilidade e seus impactos na mobilidade urbana nas grandes cidades brasileiras

Como discutido ao longo deste capítulo, o desenvolvimento sustentável, desde o final do século XX, vem influenciando no planejamento da mobilidade, mas apenas recentemente essa discussão passou a ter um caráter mais social. Devido às fortes desigualdades socioespaciais encontradas nos centros urbanos, especialmente nas grandes

idades de países em desenvolvimento, o princípio da equidade está guiando as discussões sobre o planejamento da acessibilidade e da mobilidade urbana. A metodologia mais atual que investiga esses problemas em nível estratégico apresenta duas etapas principais, que consistem na caracterização dos problemas de acessibilidade e mobilidade, seguida pelo diagnóstico de suas causas. Porém, existem limitações nos métodos propostos para se analisar as relações causais entre a acessibilidade e seus determinantes, bem como as relações entre níveis de acessibilidade e os padrões de mobilidade. Assim, foi realizada uma revisão para se interpretar quais são os determinantes das desigualdades na acessibilidade em nível estratégico, explicitando suas fontes de endogeneidade e seu impacto nos padrões de mobilidade. Para isso, recorreu-se ao entendimento sobre como é formada a acessibilidade. Sendo um produto da interação entre os subsistemas urbanos e das características do indivíduo, foi identificada a influência que cada subsistema possuía sobre os componentes da acessibilidade.

O histórico de formação e as relações entre os subsistemas das cidades são complexos, cada uma possuindo suas particularidades. Apesar disso, é possível traçar semelhantes aspectos socioeconômicos e um conjunto de características que nortearam o desenvolvimento urbano que levaram às desigualdades socioespaciais na acessibilidade aos empregos em grandes cidades brasileiras, apresentando também semelhantes padrões de mobilidade.

Assim, baseando-se no conhecimento obtido através deste capítulo e apoiado na representação dos problemas proposto por Garcia (Figura 8), a Figura 11 busca representar as inadequações no subsistema de uso do solo e as ineficiências no subsistema de transportes que levam as desigualdades na acessibilidade e seus impactos na mobilidade urbana em grandes cidades brasileiras. Essa representação, levando em consideração a representação conceitual dos subsistemas de uso do solo e transportes de Lopes (2015) (Figura 9), busca apontar quais problemas no funcionamento interno de cada subsistema que levam aos problemas de desigualdades na acessibilidade para o caso brasileiro, como descrito a seguir. Os problemas internos para o subsistema de atividades não foram representados, sendo apenas representado o impacto (desigualdades socioeconômicas) devido aos desequilíbrios entre a oferta e demanda de empregos.

2.6.1 Inadequações do subsistema de uso do solo

O processo de urbanização no Brasil ocorreu com maior intensidade na década de

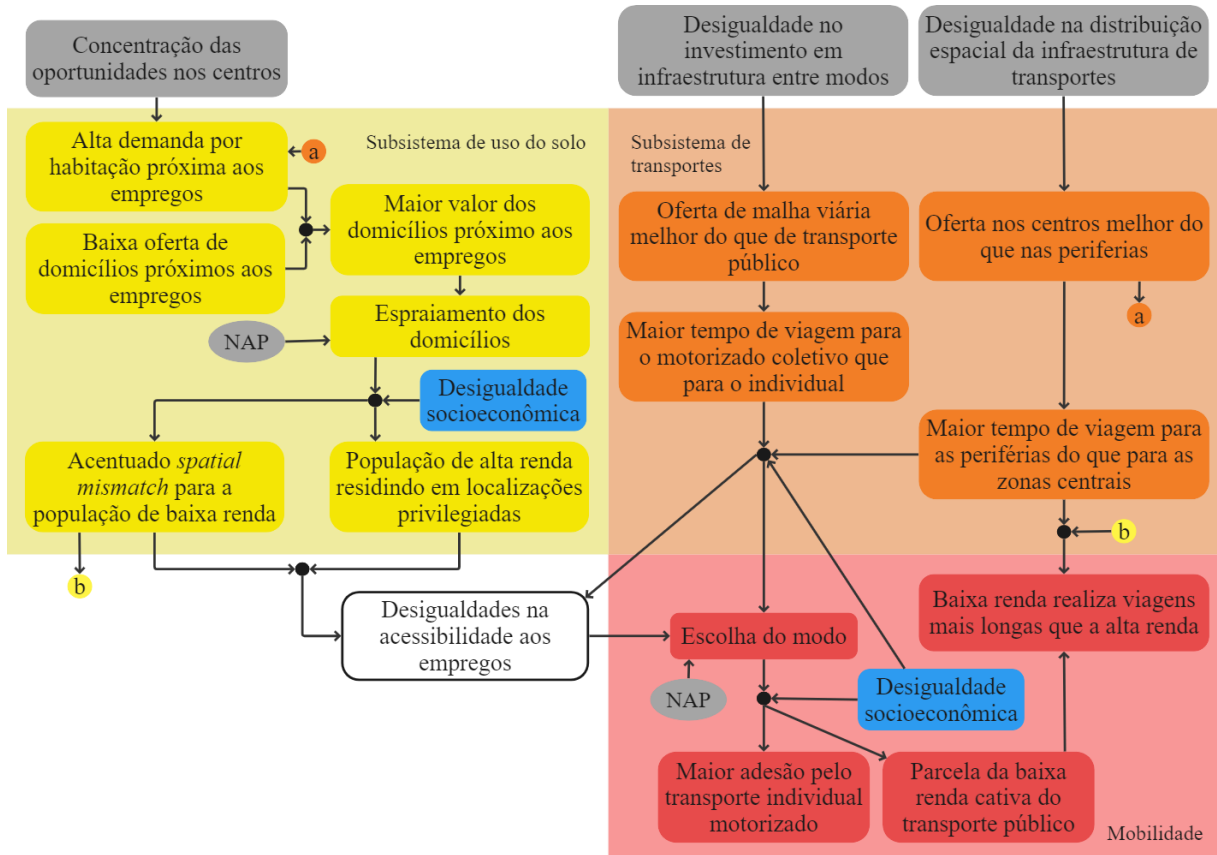
1940. Houve uma grande migração da população do campo para a cidade, gerando uma alta demanda por habitação e empregos, que foi suprida de forma precária. Os valores elevados dos domicílios nos centros levaram a população mais pobre a residir nas periferias, muitas vezes tendo que optar por habitações informais (Santos, 1993). As políticas habitacionais aplicadas no país reforçaram a exclusão regional vivida pela população de menor renda ao oferecer moradias em regiões periféricas, desconectadas da infraestrutura e oportunidades oferecidas pela cidade (Marguti, 2018). O crescimento da população urbana associado aos padrões de habitação nas periferias proporcionou o espraiamento das cidades. Apesar dos domicílios estarem mais espalhados pelo espaço, os empregos continuaram concentrados nos centros, levando a maiores distâncias entre população e empregos, caracterizando o *spatial mismatch*. A população de alta renda, e posteriormente de média renda, passou por um processo de descentralização, contribuindo para o espraiamento. A popularização dos condomínios fechados em locais afastados do centro, vistos como uma promessa de maior qualidade de vida, diferente dos conturbados centros urbanos, gerou um processo de autosegregação dessa parcela social (Frey; Duarte, 2006). Essas novas localizações foram providas por infraestrutura e oportunidades (Vasconcelos; Corrêa; Pintaudi, 2013), se tornando áreas valorizadas e muitas vezes formando subcentralidades. Apesar de habitarem em locais providos de atividades, os empregos para a alta renda geralmente ainda se encontram nos centros. Dessa forma, as viagens através de transporte motorizado individual com motivo trabalho se tornam mais longas.

A quantidade de viagens e os modos de transporte utilizados pelos indivíduos varia de acordo com suas características econômicas e sociais. Famílias de alta renda usam mais automóvel do que qualquer outro modo e realizam mais viagens (Vasconcelos, 2018). Dados da Pesquisa de Mobilidade da População Urbana (2017) mostram que o transporte coletivo é o principal meio de deslocamento utilizado pela população de renda mais baixa (pelo critério Brasil, classes C, D e E). Apesar disso, a pesquisa também mostrou que entre 2006 e 2017 aumentou o número de pessoas dessa classe que diminuíram ou deixaram de usar totalmente o transporte público no Brasil. Um dos motivos para isso são as altas tarifas do transporte público, não compatíveis com a renda mensal da classe mais vulnerável (Carvalho; Pereira, 2011). Assim, famílias cativas do transporte público podem acabar diminuindo o número de viagens devido às restrições orçamentárias. Considerando que grande parte da baixa renda habita nas periferias, essa classe ainda precisa enfrentar maiores distâncias para se chegar aos empregos.

2.6.2 Ineficiências no subsistema de transportes

O Brasil seguiu a tendência internacional em priorizar o transporte motorizado individual (Gomide, 2006), especialmente com a abertura de vias de alta capacidade e expressas. No final do século XX, houve o aumento dos problemas trazidos pela alta taxa de motorização no país, como congestionamentos, poluição e acidentes. Além disso, a população de menor renda, grande parte dependente do sistema de transporte coletivo, sofria ainda mais para se deslocar pela cidade devido às altas tarifas dos transportes e a inadequação na oferta dos serviços (Gomide, 2006). No início deste século, a oferta de transporte público foi ampliada através de medidas como a criação de faixas exclusivas para ônibus (Gomide; Galino, 2013) e BRT's (Moreno-Monroy; Ramos, 2021). Porém, a construção de malha viária ainda foi priorizada, muitas vezes havendo atrasos na entrega de projetos de ampliação da infraestrutura de transporte público (Moreno-Monroy; Ramos, 2021). Assim como a distribuição dos empregos, a oferta de transporte público e de malha viária são distribuídos de forma desigual no espaço, sendo as áreas centrais mais privilegiadas. Dessa forma, a proporção da população de menor renda (localizada em grande parte na periferia) que vive próxima a infraestrutura de transporte público de alta capacidade é menor que a parcela de alta renda (Boisjoly *et al.* 2020). Enquanto os centros e os locais de residência da alta renda possuem um bom sistema de malha viária, nas franjas da cidade estão os piores índices de infraestrutura (Vasconcellos, 2018). O sistema de ônibus, um dos principais meios de transporte coletivo, é formado por linhas troco-alimentadora, levando à necessidade de transbordos na conexão entre a periferia e o centro da cidade. Assim, além das maiores distâncias, a população residente da periferia ainda tem que enfrentar um sistema de menor velocidade, fazendo com que os tempos de viagem para o transporte coletivo sejam maiores que aqueles por transporte individual (Vasconcellos, 2018). Essa desigualdade na oferta entre infraestruturas pode ser a causa da queda das viagens por transporte público e aumento das viagens por transporte motorizado individual, mesmo em famílias de baixa renda (Ipea, 2021). Isso indica que, quando podem arcar com os custos, as famílias preferem optar pelo modo motorizado individual.

Figura 11 - Representação dos determinantes das desigualdades na acessibilidade e na mobilidade



Fonte: Elaborado pela autora.

Assim, os fluxos nas redes são o resultado da ponderação que os indivíduos realizam entre a localização das atividades e as impedâncias do deslocamento, e seu comportamento vai variar de acordo com suas características individuais. Os consequentes padrões de mobilidade podem ser então analisados a partir dos princípios do desenvolvimento sustentável. Do ponto de vista social, as desigualdades na acessibilidade geram padrões excludentes. Pessoas de classes mais altas podem alcançar mais e melhores oportunidades, pois vivem em locais com melhor infraestrutura para transporte individual motorizado, ou já vivem próximas às oportunidades. Já a classe mais baixa utiliza modos mais lentos, como o coletivo, além de geralmente morar mais longe das atividades, o que a leva a também realizar menos viagens, muitas vezes restritas a deslocamentos compulsórios, como estudar e trabalhar. Mesmo quando estão submetidas ao mesmo nível de infraestrutura de transportes e uso de solo, o comportamento ainda varia de acordo com a classe social, pois mudam os modos e a quantidade de viagem realizada.

3 VIÉS NAS RELAÇÕES DE CAUSALIDADE EM MODELOS ESTATÍSTICOS DA PROBLEMÁTICA DA ACESSIBILIDADE E MOBILIDADE URBANA

No processo de compreensão da problemática das desigualdades socioespaciais na acessibilidade, a etapa de diagnóstico é aquela em que se deve avaliar as relações de causalidade hipotetizadas (Garcia *et al.* 2018). Nas propostas metodológicas de Garcia (2016) e Souza (2019), essas relações devem passar inicialmente por uma análise exploratória através da mensuração de correlações. Logo após, na análise confirmatória, Garcia (2016) propõe utilizar modelos de regressão linear clássica e espacial global, enquanto Sousa (2019) recomenda utilizar modelos de regressão geponderada (local). Essas ferramentas estatísticas apresentam limitações para detectar endogeneidade nos modelos, reduzindo seu poder explicativo ou gerando relações espúrias.

A teoria da inferência causal vem se mostrando como uma alternativa para se entender as relações de causalidade em sistemas complexos. Uma de suas vantagens é a utilização dos modelos de equação estruturais (SEM), que oferecem a possibilidade de medir os efeitos diretos e indiretos entre as variáveis. Dessa forma, é possível explicitar as fontes de endogeneidade no modelo estatístico. Além disso, seus métodos de estimativa são voltados para a explicação dos fenômenos que geraram os dados (Siqueira, 2020), o que converge para o objetivo no planejamento urbano estratégico integrado de se diagnosticar a problemática das desigualdades na acessibilidade e mobilidade. Porém, ainda existem lacunas em relação à utilização dessa teoria com dados agregados e modelados, já que as pesquisas utilizadas na literatura de sistemas urbanos são, em sua grande maioria, baseados em dados observacionais coletados no nível do indivíduo.

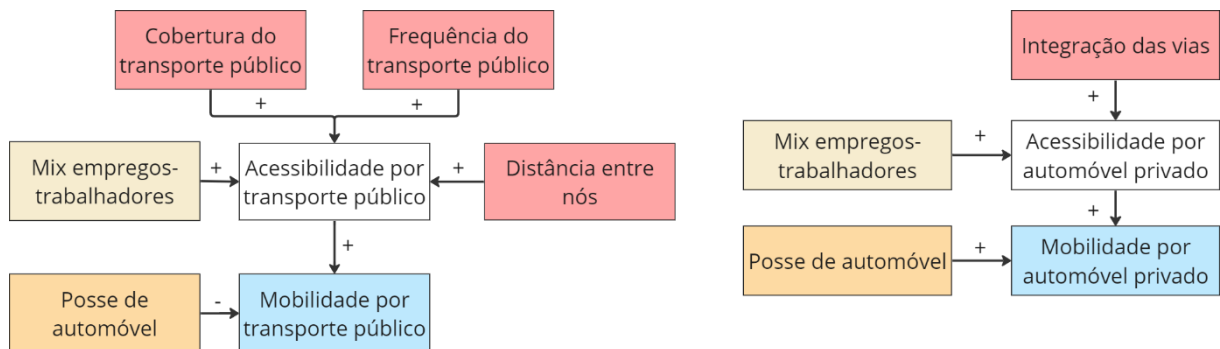
Buscando atingir parte do objetivo (b) desta dissertação, na seção 3.2 são apresentadas as modelagens das relações causais entre a acessibilidade e seus determinantes, em nível estratégico, propostas na literatura. Entender como foi realizada a modelagem, bem como as premissas utilizadas, ajudará a revelar as possíveis fontes de viés e má interpretação dos resultados. Na seção 3.3 é realizada uma discussão sobre as limitações associadas ao ferramental estatístico utilizado para o diagnóstico das relações causais. A seção 3.3 apresenta uma revisão dos princípios da teoria da inferência causal, tendo como principal base os estudos de Pearl (2000). Essa teoria se apresenta como uma alternativa à inferência estatística, sendo utilizada na proposta metodológicas de análise das relações de causalidade da problemática das desigualdades na acessibilidade e mobilidade urbana. A seção 3.4 apresenta as considerações finais do capítulo.

3.1 Propostas metodológicas de modelagem estatística da causalidade entre acessibilidade e mobilidade

3.1.1 Modelagem estatística em Garcia (2016)

Os determinantes dos problemas na acessibilidade e na mobilidade hipotetizadas por Garcia (2016) foram ilustrados na Figura 8. As inadequações no uso do solo, as características individuais da população e as ineficiências nos transportes são colocadas como as causas dos problemas na acessibilidade. Em um trabalho posterior (Garcia *et al.* 2018), o método desenvolvido por Garcia (2016) foi aplicado para se avaliar os problemas de acessibilidade e mobilidade ao trabalho na cidade de Lisboa, por transporte público e por automóvel privado. Garcia *et al.* (2018) realizaram duas modelagens sequenciais. Na primeira, os modelos de regressão linear continham a acessibilidade como variável dependente e os problemas nos subsistemas urbanos como suas causas. Em seguida, a mobilidade foi modelada como a variável dependente e a acessibilidade como a variável explicativa, como ilustrado graficamente na Figura 12.

Figura 12 - Representação das hipóteses de causalidade formuladas por Garcia *et al.* (2018)



Fonte: Elaborado pela autora.

Foi utilizado um indicador de acessibilidade do tipo gravitacional, adaptado para incluir a competição pelas atividades, como mostrado na Equação 1, onde: $A_{i,m}$ é a acessibilidade aos empregos, em cada zona i e por modo m (privado ou público); E_j é o número de empregos oferecidos em cada zona de destino j ; e $R(T_{ij})$ é a curva logística generalizada (valor de Richards) para o total de tempo viajado. Os indicadores da mobilidade e restrições derivadas dos subsistemas podem ser vistos no Quadro 2.

$$A_{i,m} = \frac{\sum(R(T_{ij}) \times E_j)}{\sum E_j} \quad (1)$$

Após a mensuração da correlação espacial e não espacial entre a acessibilidade e seus determinantes, os autores encontraram correlação significativa entre os indicadores do subsistema de transportes e a acessibilidade, sendo a correlação espacial um pouco menor que a de Pearson. Já a correlação da acessibilidade com o indicador do uso do solo não foi significativa.

Quadro 2 - Indicadores utilizados por Garcia et al. (2018)

Sistema	Indicador
Mobilidade	Total de número de viagens por pessoa produzido no pico da manhã (7:00-10:00), por automóvel privado e transporte público, em cada zona
Transportes – topologia	Integração das vias - número de curvas que precisam ser feitas a partir de uma via para alcançar todas as outras vias da rede, usando o caminho mais curto, agregado para cada zona
Transportes – topologia	Distância entre nós – o inverso da soma das distâncias (caminhos mais curtos) entre um nó e todos os outros nós para cada zona
Transportes - características operacionais	Cobertura do transporte público – número total de paradas e estações ponderado pelas distâncias de 400 m e 800 m, respectivamente, em cada zona
Transportes - características operacionais	Frequência do transporte público – média da frequência (número de veículos por hora) de todos os modos de transporte público disponíveis em cada zona
Uso do solo	Mix de empregos-trabalhadores – taxa entre o número de empregos disponíveis e de pessoas trabalhadoras que residem em cada zona
Característica da população	Número de veículos por pessoa em cada zona

Fonte: Elaborado pela autora.

Após a calibração das equações de regressão, a única variável explicativa significativa nos modelos da acessibilidade por automóvel privado foi a integração nas vias. Já nos modelos da acessibilidade por transporte público, todas as variáveis foram significativas. O indicador do uso do solo foi o menos influente de todos, com baixo valor de β . Em ambas as modelagens, o β para os modelos espaciais foram menores do que nos modelos não espaciais. Os autores chegaram à conclusão de que o subsistema de transportes era mais influente do que o de uso do solo.

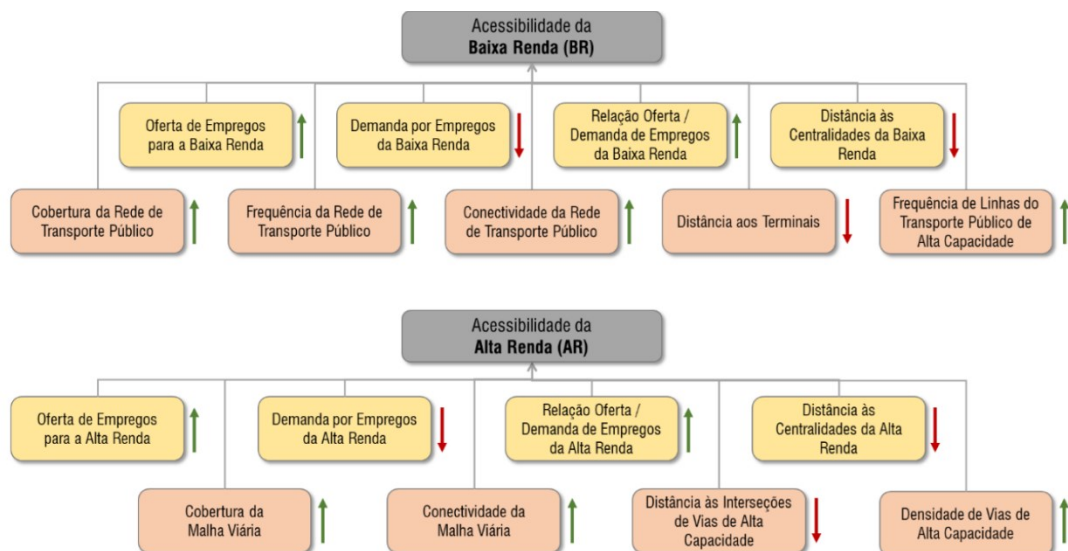
Para o diagnóstico dos determinantes dos problemas de mobilidade, foram utilizados os indicadores de acessibilidade aos empregos e de posse de automóvel. A hipótese era de relação direta entre a mobilidade e seus determinantes, a não ser entre a mobilidade por transporte público e a posse de veículos, que se esperava ser inversa. Os testes de correlação

foram significativos e positivos para todas as relações, sendo, novamente, o Índice de Moran um pouco menor que a correlação de Pearson. As variáveis explicativas foram significativas nos dois tipos de modelos de regressão, para os dois modos. Os resultados dos dois modelos também apontaram a posse de veículo como maior peso do que a acessibilidade, sendo a relação positiva até mesmo entre a posse de automóvel e o número de viagens por transporte público.

3.1.2 Modelagem estatística em Sousa (2019)

A Figura 13 mostra as relações hipotetizadas por Sousa (2019), enquanto o Quadro 3 apresenta a descrição desses indicadores. O autor considerou que tanto as restrições do subsistema de uso do solo quanto as do subsistema de transporte influenciavam diretamente na acessibilidade. Foram modeladas diferentes equações para a população de baixa e da alta renda, tendo como premissa que a população de baixa renda é cativa do transporte público. As setas com direção de baixo para cima indicam relação direta entre a restrição e a acessibilidade, e as de cima para baixo, relação inversa.

Figura 13 - Hipóteses de causalidade formuladas por Sousa (2019)



Fonte: Sousa (2019).

Sousa (2019) utilizou um indicador baseado em utilidade que mede a acessibilidade a partir de cada zona e varia de acordo com a classe social de um grupo e com o tempo, como mostrado na Equação 2, onde: $ACES_{n,m,t,i}$ é a acessibilidade, sendo n o grupo

populacional, m o tipo de emprego, t o cenário (ano) de análise e i a zona de origem; $Emp_{t,m,j}$ é a quantidade de empregos, sendo j a zona de destino; $Dom_{t,n,i}$ é a quantidade de domicílios; $logsum$ é a impedância do deslocamento; e $Coef_{t,m,n}$ são os coeficientes intersetoriais de uma matriz input-output que permitem classificar os empregos de acordo com o grupo populacional a que se destinam.

$$ACES_{n,m,t,i} = \frac{\frac{\sum_{m,j} Emp_{t,m,j}}{\sum_i DOM_{t,n,i}}}{\frac{\sum_i [logsum_{n,t,i,j} * \sum_m (Coef_{t,m,n} * Emp_{t,m,j})]}{\sum_{m,j} (Coef_{t,n,m} * Emp_{t,m,j})}} \quad (2)$$

A oferta de empregos e a distância às oportunidades, ambos indicadores do uso do solo, foram mensuradas pelas Equações 3 e 4, respectivamente. Os demais indicadores são descritos no Quadro 3, sendo indicado se pertencem ao subsistema de uso do solo ou ao de transportes, esse último dividido entre as características do transporte público (TP) e da rede viária.

$$EMP_{t,n,i} = \frac{\sum_m (Coef_{t,m,n} * Emp_{t,m,j})}{Área_i} \quad (3)$$

$$DIS_{t,n,i} = \frac{\sum_c (distância_{i,c} * EMP_{t,n,c})}{\sum_c EMP_{t,n,c}} \quad (4)$$

Após a análise exploratória, o autor retirou os indicadores que não possuíam a correlação no sentido da hipótese elaborada. Também foram retirados da modelagem os indicadores que não contribuíam no modelo calibrado, sinal de que existe uma dependência entre eles. Por exemplo, o indicador da distância dos empregos às centralidades apresentou forte correlação com acessibilidade, mas não apresentou coeficiente significativo na calibração do modelo. Isso pode ser um indicativo de que as relações entre os determinantes e a acessibilidade podem não ser todas diretas, havendo relações indiretas, que passam por outros determinantes também incluídos na modelagem. Além disso, a não especificação dos caminhos indiretos e possíveis fontes de endogeneidade pode ter causado viés nos resultados. Assim, a influência dos indicadores excluídos não pode ser mensurada através da modelagem, limitando o conhecimento sobre a influência dos subsistemas na acessibilidade.

Quadro 3 - Descrição dos indicadores utilizados com Sousa (2019)

Subsistema	Indicador
Uso do solo	Demanda por empregos - quantidade de domicílio dividido pela área
Uso do solo	Relação entre oferta e demanda - quantidade de empregos dividido pela quantidade de domicílios
Transportes - TP	Cobertura da rede ($COB_{TPt,i}$) - densidade de paradas de ônibus por zona
Transportes - TP	Frequência da rede ($FRE_{TPt,i}$) - soma da frequência de todas as linhas de ônibus que passam por uma zona na hora de pico da manhã dividida por sua área
Transportes - TP	Presença de elementos de alta capacidade ($AL_{CA_{TPt,i}}$) - soma da frequência de 20% das linhas que possuem as maiores frequências na hora de pico da manhã dividida pela área da zona
Transportes - TP	Conectividade da rede de transporte coletivo ($CON_{TPt,i}$) - densidade de interseções em que ocorrem encontros de 2 ou mais linhas do transporte coletivo, representando nós da rede em que a integração é fácil de ser realizada
Transportes - TP	Distância aos terminais ($TERT_{t,i}$) - distância na rede de transporte público ao terminal de integração mais próximo
Transportes – rede viária	Cobertura da rede ($COB_{MVt,i}$) - densidade de quilômetros de vias por zona
Transportes – rede viária	Presença de elementos de alta capacidade ($AL_{CA_{MVt,i}}$) - densidade de vias arteriais e expressas por zona
Transportes – rede viária	Conectividade da malha viária ($CON_{MVt,i}$) - densidade de interseções
Transportes – rede viária	Distância às interseções de alta capacidade ($INTt,i$) - distância na malha viária às interseções de alta capacidade

Fonte: Elaborado pela autora.

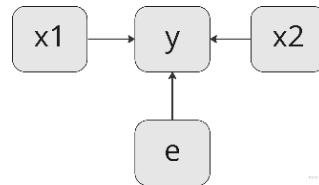
3.2 Problemas de viés e interpretação causal em modelos estatísticos

Como discutido na seção 3.2.1, para analisar relações de causalidade, Garcia (2018) *et al.* calibraram modelos de regressão linear múltipla não espacial e espacial. Análises de regressão linear são utilizadas na inferência estatística quando se quer obter informações sobre uma variável (ou prevêê-la) através de um conjunto de outras variáveis conhecidas (Devore, 2006). Quando duas ou mais variáveis estão relacionadas de forma não determinística, é incluído o que se chama de erro, que é causado por influências não consideradas no modelo, como ilustra a Equação 5.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \varepsilon \quad (5)$$

Essa equação representa a situação em que uma variável y sofre influência de duas outras variáveis, x_1 e x_2 . A análise de regressão busca então estimar os parâmetros da equação ao encontrar a correlação entre as variáveis minimizando o erro através do princípio dos mínimos quadrados. Se a causalidade existe como foi estabelecido na equação, a relação entre as variáveis pode ser ilustrada como mostrado na Figura 14.

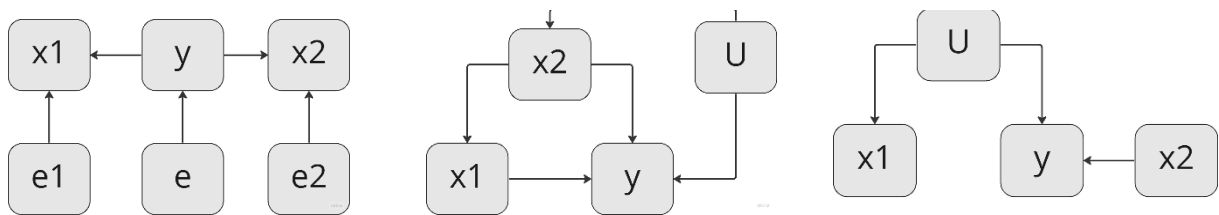
Figura 14 - Ilustração de estrutura de causalidade em modelos de regressão linear múltipla



Fonte: Elaborado pela autora.

Porém, o modelo gerado pelas equações apenas detecta a correlação entre as variáveis, não sendo possível verificar se o processo que gerou essa correlação está de acordo com o que foi hipotetizado, nem mesmo que a direção dos efeitos segue o padrão ilustrado. Outras hipóteses que possam melhor representar a realidade, e não são consideradas nas análises de regressão, estão ilustradas na Figura 15.

Figura 15 - Ilustração de estruturas alternativas de causalidade



Fonte: Elaborado pela autora.

O primeiro modelo da Figura 15 mostra que, apesar de existir correlação entre as variáveis, a direção da causalidade é revertida, não gerando coeficientes confiáveis. O segundo modelo ilustra duas situações que não conseguem ser percebidas através de regressões: existe uma relação indireta entre x_2 e y que passa por x_1 ; existe também uma causa em comum (U) entre y e x_2 não explícita no modelo (endogeneidade). Essas relações irão gerar viés na estimativa dos parâmetros, não revelando os verdadeiros efeitos causais. O terceiro modelo da Figura 15, demonstra um caso de relações espúrias: x_1 não é a causa de y e a correlação entre as variáveis só existe devido a uma terceira variável, que é U .

A regressão linear clássica deve seguir algumas premissas, que podem ser resumidas como: a amostra foi coletada de forma aleatória; os parâmetros são lineares; os resíduos devem ser aleatórios e normalmente distribuídos; não existir correlação entre as

variáveis independentes. As duas últimas premissas são violadas quando há autocorrelação espacial entre as variáveis. A autocorrelação gera uma redundância nos resultados, fazendo com que menos informação seja acrescentada ao se adicionar novas variáveis (O'sullivan; Unwin, 2010). Nessas situações, modelos de regressão espacial podem ser utilizados, já que incorporam um componente espacial.

Em seu trabalho, Garcia (2016) verificou a presença de autocorrelação espacial no erro dos modelos de regressão clássica, optando assim por um modelo de regressão espacial com dependência no erro. Esse tipo de modelagem é semelhante à clássica, inclusive na consideração de que o processo que gerou os dados é o mesmo para todas as regiões (modelo global). Seu diferencial é que incorpora um componente para inclusão da autocorrelação espacial entre as variáveis independentes, efeito que estava contido no erro do modelo de regressão não espacial. Porém, todos os demais problemas envolvidos na interpretação dos resultados vindos da estimativa de regressões não espaciais ainda podem existir nas espaciais. Mais ainda, o fato de haver correlação espacial entre os indicadores revela que existe uma ou mais variáveis desconhecidas gerando esse padrão, mas que não estão sendo incorporadas na modelagem.

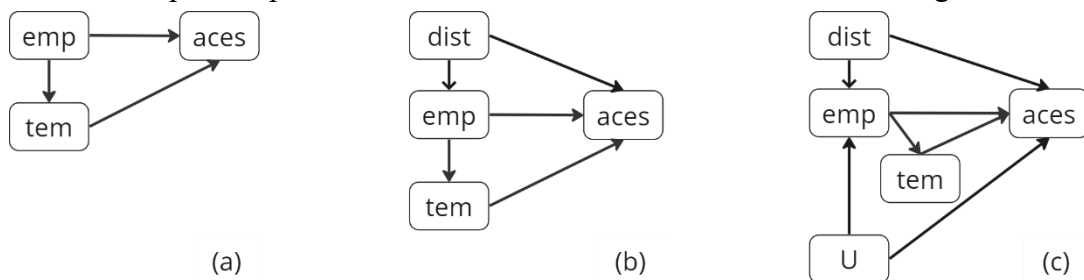
No diagnóstico da problemática proposto por Sousa (2019), buscou-se mensurar o efeito das restrições sobre a acessibilidade através de modelos de regressão geponderada. A regressão geograficamente ponderada (RGP) é similar a uma regressão não espacial, com a diferença de que os parâmetros são estimados localmente para cada ponto específico e de acordo com uma função que diminui a relevância dos dados de acordo com sua distância do ponto de regressão. A RGP é usada quando indicadores globais não são uma boa representação para o fenômeno. Isso pode ocorrer por uma série de fatores, entre eles, existe a possibilidade de que variáveis relevantes estão sendo omitidas do modelo, ou o modelo está mal especificado (Fotheringham; Brunson; Charlton, 2002).

Utilizar a inferência estatística para se obter interpretações causais dos coeficientes estimados, sem levar em consideração mecanismos para avaliar adequadamente o isolamento de variáveis e direção das relações analisadas, pode levar a uma má interpretação dos efeitos obtidos (Westreich; Greenland, 2013). Para se analisar as relações causais com melhor clareza, pode-se utilizar um diagrama causal. Essa ferramenta será mais bem explorada na seção 3.4, mas nesta seção são explicadas algumas de suas características. De acordo com Pearl *et al.* (2016), o caminho que se forma entre duas variáveis de interesse é chamado de *front-door*, podendo ser direto e/ou indireto. Um caminho indireto é aquele entre duas variáveis que passa por outras variáveis, chamadas de mediadoras. Pode-se chamar de

efeito total o resultado da medida do conjunto com todos os caminhos causais entre duas variáveis de interesse, e de efeito direto àquele obtido após se controlar todos os caminhos indiretos (Westreich; Greenland, 2013).

Para exemplificar essas associações, pode-se supor como verdadeiro o diagrama causal (a) da Figura 16, onde o tempo de espera nas paradas (*tem*) e o número de empregos (*emp*) em uma área possuem efeito sobre acessibilidade (*aces*). A variável *emp* possui um efeito sobre *tem* ao se levantar a hipótese de que locais com mais empregos possuem uma maior frequência de linhas de ônibus, diminuindo, portanto, o tempo de espera. O caminho $emp \rightarrow tem \rightarrow aces$ é um efeito indireto da variável empregos sobre acessibilidade, mediado por tempo de espera. Enquanto o caminho $tem \rightarrow aces$ gera o efeito direto (e total) de tempo sobre acessibilidade, o caminho $emp \rightarrow aces$ gera apenas o efeito direto de empregos sobre acessibilidade.

Figura 16 - Exemplos de possíveis fontes de viés ilustradas através de um diagrama causal



Fonte: Elaborado pela autora.

Ou seja, ao se estimar uma regressão do tipo:

$$aces = \beta_0 + \beta_1 tem + \beta_2 emp \quad (6)$$

os coeficientes não podem ser entendidos da mesma forma, pois enquanto β_1 expressa o efeito total de *tem*, β_2 apresenta apenas um efeito direto, possuindo ainda um efeito indireto que não está sendo considerado na equação. Para estimar esse efeito, uma equação onde conste apenas a variável *emp* deve ser estimada, podendo então esse coeficiente ser comparado com o β_1 . Considerando que o modelo (a) da Figura 16 está corretamente especificado, os efeitos diretos das variáveis de interesse podem ser obtidos sem nenhum viés. Porém, ao considerar um cenário em que a distância (*dist*) até os centros comerciais de uma cidade possui influência sobre a acessibilidade e a quantidade de empregos, como foi ilustrado pelo diagrama (b) na Figura 16, cria-se uma situação de endogeneidade. Conforme proposto originalmente por Pearl (2000), o caminho entre uma variável de confundimento e as variáveis de interesse se chama de *back-door*. Quando não controladas, essas variáveis causam viés nas estimativas,

resultando em conclusões não confiáveis. Nesse novo cenário, ao se regressir a Equação 6, o efeito direto de *tem* sobre *aces* não seria afetado, pois o efeito de *dist* sobre *tem* seria bloqueado ao se incluir na equação (controlar) a variável *emp*. Já o valor do efeito direto de *emp* sobre *aces* sofreria um viés, pois existe um caminho entre essas duas variáveis que não foi controlado. O efeito de *emp* sobre *aces* só seria corretamente estimado ao se incorporar a variável *dist* na equação.

Pearl (2000) define ainda um *collider* como uma outra possível forma de confundimento. Um *collider* ocorre quando uma variável se encontra em um caminho não direcionado (não segue a direção apontada pelas setas) entre duas outras variáveis. Por exemplo, no diagrama (c) da Figura 16, a variável U, além de causar endogeneidade nas estimativas de *emp*, também faz dessa variável um *collider* no caminho não direcionado $dist \rightarrow emp \leftarrow U$. Portanto, quando indevidamente controlado, o *collider* se torna uma variável de confundimento. Considerando agora que o diagrama (c) foi corretamente modelado, mas apenas as variáveis *tem*, *dist* e *emp* foram consideradas como explicativas, ocorre o seguinte: a estimativa de *tem* não é afetada, pois a influência que poderia sofrer por U está bloqueada ao se controlar *emp*; U causa viés nas estimativas de *emp*; a estimativa de *dist* sofre viés, pois o *collider emp* foi controlado, criando uma correlação com U. Para evitar o viés em *emp* e *dist*, é necessário que U seja também incluído como um determinante. Uma terceira fonte de viés pode ocorrer devido a uma variável moderadora, que é aquela que está em um caminho de *back-door* e modifica o efeito entre a variável dependente e as variáveis independentes. Em outras palavras, existem subgrupos na população de interesse que, apesar de apresentarem a mesma estrutura causal, possuem estimativas diferentes a depender do valor da variável moderadora (Pearl *et al.* 2016).

3.3 Princípios da teoria da inferência causal

Experimentos para se testar causalidade tradicionalmente envolvem a simulação de processos e a possibilidade de se realizar intervenções, como os métodos de controle e de randomização (Shiple, 2016). Assim, é possível observar como o sistema reage a partir da modificação de suas partes. Ao se observar que quando X varia, obtém-se uma variação proporcional em Y, dado que as demais variáveis envolvidas foram mantidas constantes, é estabelecida a relação de causalidade. Dessa forma, inferência causal pode ser definida como as conclusões tiradas de dados obtidos a partir de variações em um determinado sistema (Dawid, 2010). É através do controle das variáveis que dados podem virar informação sobre

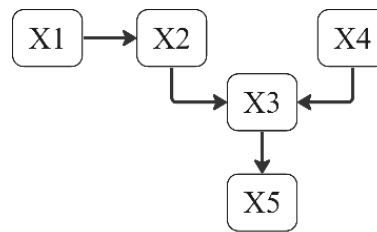
como os sistemas são formados.

De acordo com Shipley (2016), esse controle não precisa ser necessariamente físico, podendo ser estatístico. Supondo que se queira analisar o efeito de X sobre Y , o controle estatístico é obtido quando uma série de pares de dados coletados dessas duas variáveis está disponível, e é possível agrupar subconjuntos em que $X = x_i$ é mantido constante em cada um deles. Dessa forma, é possível observar como Y reage ao se variar X , mesmo que não tenha ocorrida a intervenção direta do pesquisador. Fica claro que para ser realizado o controle estatístico se faz necessária uma fonte de dados suficientemente robusta, em que seja possível observar a mudança das variáveis envolvidas, o que nem sempre está disponível. De acordo com Van Wee, Annema e Banister (2013), zonas de análise que não apresentam diferenças significativas em relação às variáveis estudadas se mostram como um dos problemas que levam a contradições entre conclusões de estudos na literatura. O entendimento das relações internas e externas entre os subsistemas urbanos, a acessibilidade e os padrões de mobilidade depende do controle estatístico, já que muitas vezes o controle físico ou não é possível ou não é ético.

3.3.1 Diagramas causais

A primeira etapa para a investigação da causalidade através de dados observacionais é a construção de um diagrama causal, que irá representar graficamente as relações de causalidade hipotetizadas na análise. De acordo com Pearl (2000), os diagramas causais são a linguagem matemática que podem expressar as relações de causalidade entre as variáveis de um fenômeno. Os diagramas causais devem ser acíclicos e são formados por vértices, que representam as variáveis em estudo, e setas, que representam a direção de causalidade entre elas, como ilustrado na Figura 17. Existem três casos que são representados pelas setas (ou pela ausência delas). Uma seta que aponta apenas para uma direção (unidirecional) indica o caminho de causa e efeito entre as duas variáveis. Por exemplo, da Figura 17, $x_1 \rightarrow x_2$ indica que x_1 é uma causa direta de x_2 . Um caminho entre duas variáveis que não possui nenhuma seta indica que não existe relação de causalidade entre elas, como entre x_1 e x_4 . O terceiro tipo de seta é a bidirecional, que aponta para duas variáveis e transmite a ideia de que existe uma correlação entre as duas, mas que suas causas não são explicadas.

Figura 17 - Ilustração de um diagrama causal



Fonte: Autoria própria.

Em um diagrama causal, chama-se de caminho direcionado aquele que segue uma sequência de vértices sempre na sequência em que apontam as setas, como em $x1 \rightarrow x2 \rightarrow x3 \rightarrow x5$. Como já mencionado, quando um mesmo vértice recebe duas setas em direções opostas, ele é chamado de *collider*. Na Figura 17, $x3$ é um *collider* no caminho não-direcionado $x2 \rightarrow x3 \leftarrow x4$, mas não no caminho direcionado $x4 \rightarrow x3 \rightarrow x5$. A nomenclatura utilizada para se referir à configuração de um diagrama se assemelha a de uma estrutura familiar. Por exemplo, $x2$ e $x4$ são as variáveis mães de $x3$, pois possuem setas chegando a essa variável, enquanto $x5$ é sua filha, pois existe uma seta saindo de $x3$ e chegando diretamente em $x5$. Todas as variáveis que estão antes de outra variável são chamadas de ancestrais, e todas as que estão depois são as descendentes. $x2$ só possui uma ancestral, que é $x1$, e possui duas descendentes, que são $x3$ e $x5$.

Existe uma diferença entre um diagrama acíclico direcional (do inglês, *direct acyclic graph*, ou DAG) probabilístico e o causal, como exemplifica Dawid (2008). A seguir são mostrados três DAG.

- (a) $X \leftarrow Z \rightarrow Y$
- (b) $X \rightarrow Z \rightarrow Y$
- (c) $X \leftarrow Z \leftarrow Y$

Se tais diagramas forem interpretados de maneira causal, cada um deles transmite uma mensagem diferente. O diagrama (a) informa que Z é a causa de X e Y ; o (b), que X causa Z que causa Y ; e o (c), que Y causa Z que causa X . Já de maneira probabilística, os três diagramas transmitem a mesma informação: X e Y são independentes, dado Z . Para ser considerado como um diagrama causal, a estrutura do DAG deve ser apoiada com justificativas baseadas na realidade, que expliquem o porquê daquela representação (Dawid, 2008). Dessa forma, para se construir um diagrama causal que possa representar adequadamente a realidade, faz-se necessária uma fundamentação teórica que permita justificar cada hipótese de causa-efeito.

Um diagrama pode ser mais ou menos detalhado de acordo com a complexidade

do fenômeno e a necessidade do pesquisador. São chamadas de variáveis endógenas aquelas que são explicadas por outras variáveis no modelo, sendo desse tipo as variáveis que se busca descobrir como são causadas. Já as variáveis exógenas são aquelas que não possuem explicação, pois não é do interesse do pesquisador entender como são causadas, sendo usadas apenas para explicar as endógenas. Uma propriedade importante que se deve levar em consideração no detalhamento dos diagramas é a condição de Markov, que diz que o efeito em uma certa variável é totalmente explicado pelas suas causas diretas. Ou seja, as causas indiretas não surtem efeito nessa variável, dado as causas diretas. Dessa forma, por mais complexo que seja o fenômeno, o caminho entre duas variáveis pode ser simplificado, usando-se apenas as causas que sejam de interesse ou que possam criar endogeneidade na relação. Assim, um diagrama deve ser detalhado o suficiente para que fiquem explicitas as variáveis que possam trazer endogeneidade à relação que se quer entender a causalidade. Para se bloquear todas as fontes de endogeneidade no diagrama causal, devem ser bem identificados todos os caminhos de *front-door* e *back-door*.

3.3.2 Independência entre variáveis e D-separação

Duas variáveis são ditas independentes uma em relação à outra quando elas são probabilisticamente independentes. Nos diagramas causais, existe uma propriedade chamada de d-separação, que divide a independência de um vértice em relação ao outro em incondicional e condicional. No primeiro caso, a independência ocorre quando não existe nenhum caminho direcionado ligando as duas variáveis. Já no segundo caso, as variáveis são independentes apenas ao se condicionar (controlar) um conjunto de outras variáveis, que estão entre elas. Na Figura 17, x_1 e x_4 são incondicionalmente independentes, já que não existe nenhum caminho que leve causalidade entre elas. Já x_2 e x_5 são independentes apenas ao se condicionar x_3 , ou seja, ao se considerar x_3 na explicação de x_5 , a correlação com x_2 desaparece. De acordo com Shipley (2016), a d-separação é então o modo de tradução da linguagem dos diagramas causais na linguagem da probabilidade.

Ao se condicionar uma ou mais variáveis que formam um caminho direcionado entre duas outras variáveis, diz-se que se está fechando o caminho. Para evitar endogeneidade, todos os caminhos de *back-door* devem ser fechados. É importante ressaltar que o caminho entre variáveis que passa por um *collider* está naturalmente fechado, pois o *collider* impede a transmissão de efeitos. Porém, ao se condicionar um *collider*, esse caminho é então aberto, gerando relações espúrias (não causais) entre as variáveis.

3.3.3 Modelos de equações estruturais e variáveis latentes

Para se testar as relações representadas pelos diagramas causais, é necessário a tradução dessas hipóteses em linguagem matemática. Isso pode ser realizado através dos modelos de equações estruturais (SEM), que expressam as hipóteses de forma probabilística (Pearl; Glymour; Jewell, 2016). Esses modelos multivariados possibilitam a mensuração de efeitos diretos e indiretos de forma simultânea, além da incorporação de variáveis latentes (Shipley, 2016).

As variáveis latentes são aquelas que não podem ser observadas e medidas diretamente, mas que tem consequências observáveis. Ou seja, existem outras variáveis relacionadas com as latentes que são possíveis de se observar e medir, sendo então utilizadas como seus indicadores. Existem erros de medição associados a esses indicadores. Quando esses erros são pequenos o suficiente, é possível ignorá-los e considerar o indicador como a variável observada. A latente é mais necessária quando os erros contidos nos indicadores não são possíveis de se ignorar, sendo preciso a utilização de mais de um indicador. Um modelo SEM completo apresenta equações de medição e estruturais (Shipley, 2016). Uma equação de medição é aquela que apresenta apenas a relação entre a variável latente e seus indicadores. As equações estruturais mostram a relação entre as variáveis (latentes e observáveis), ou seja, representam as hipóteses de causalidade.

3.3.4 Premissas nos modelos SEM

A ideia por trás da conversão dos diagramas em linguagem estatística recai em se testar a d-separação contida nos diagramas. As equações utilizadas pelo SEM são semelhantes às da regressão linear múltipla para estimar os parâmetros, mas ao invés de minimizar as diferenças dos quadrados, elas minimizam a diferença de covariação entre os padrões observados e os modelados. Existem dois tipos de parâmetros: os fixos, que são aqueles especificados pelo analista, e os livres, que são estimados através dos dados. Os parâmetros livres e fixos irão formar uma matriz de variância, que será então comparada com a matriz obtida pela observação dos dados (Washington *et al.* 2020). Em outras palavras, o SEM busca encontrar os padrões de dependência ou independência entre as variáveis, de acordo com as relações estabelecidas nos diagramas causais, investigando se esses padrões associativos podem ter gerado os dados.

Existe uma certa variedade de estimadores que podem ser utilizados nos modelos

SEM, sendo os mais comuns os estimadores de máxima verossimilhança. Esses estimadores assumem algumas premissas que precisam ser verificados, sendo eles: os dados devem ser normalmente multivariados, deve haver homogeneidade dos efeitos e independência entre as amostras (Shipley, 2016).

A distribuição normal é caracterizada pelas medidas de assimetria e curtose (concentração dos valores ao redor da média). Para amostras pequenas e não normalmente multivariadas, os resultados do teste não são confiáveis, pois não seguem a distribuição hipotetizada. Testes que envolvem variâncias e covariâncias, como os utilizados no SEM, são mais sensíveis à curtose do que à assimetria. A não normalidade pode afetar a acurácia do teste, os erros padrão dos parâmetros livres e a estimativa dos parâmetros.

A premissa de homogeneidades nos modelos SEM assume que um mesmo processo foi o responsável por gerar todos os dados (Shipley, 2016). Essa afirmativa pode ser falsa quando uma variável pode ser subdivida em grupos e ocorre um destes dois casos: cada grupo gera parâmetros que possuem efeitos com intensidades diferentes; a diferença entre grupos ocorre devido a diferentes (ou parcialmente diferentes) processos. O primeiro caso pode ser entendido como efeito moderador. Uma variável moderadora é aquela que está em um caminho de *back-door* e afeta o efeito entre a variável dependente e as variáveis independentes. Isso significa que a variável moderadora influencia no comportamento das variáveis independentes, fazendo com que apresentem intensidades diferentes, apesar de apresentarem a mesma estrutura (Pearl; Glymour; Jewell, 2016). Em ambos os casos, para se comparar os processos causais entre grupos diferentes, faz-se necessário um modelo que possa identificar essas diferenças, o que pode ser feito através dos modelos SEM multigrupo. A abordagem do SEM multigrupo permite comparar estatisticamente os modelos e identificar quais partes (ou parâmetros) são iguais e quais são diferentes. O modelo multigrupo pode ser estimado com apenas algumas adaptações em relação ao modelo normal. Se houvesse apenas um grupo de valores para serem estimados, haveria apenas uma matriz de covariância observada e uma matriz modelada. Havendo n grupos, também haverá n matrizes observadas e modeladas. Então, são escolhidos interativamente conjuntos desses parâmetros para serem minimizados simultaneamente. O valor de teste e o grau de liberdade multigrupo é a soma dos valores encontrados em cada grupo individualmente.

O primeiro passo é restringir os parâmetros em todos os modelos a serem estimados com o mesmo valor. Ou seja, admite-se que mesmo não sabendo qual o valor dos parâmetros, eles devem ser iguais em todos os grupos. Anota-se o valor do teste e depois repete-se o processo, porém, liberando um dos parâmetros entre os grupos de cada vez, isto é,

assume-se que um dos parâmetros não são iguais entre os grupos, deixando que ele varie livremente. Calcula-se a probabilidade desses valores serem diferentes entre cada iteração. O valor de teste deve ser dividido pelo número de vezes em que o teste é realizado, o que é igual ao número de parâmetros que se quer variar. Dessa forma, serão observados valores de testes diferentes apenas quando uma das variáveis se mostrarem diferentes entre os grupos.

Por fim, a premissa de independência entre as amostras assume que cada amostra é um pedaço único de informação sobre a população em estudo, e que cada uma é igualmente distinta das outras. Porém, essa premissa pode ser violada quando existe correlação entre as variáveis no tempo ou no espaço (Shiple, 2016). Ou seja, dentro da mesma população existem amostras que são mais parecidas umas com as outras, formando grupos que transmitem uma mesma informação. Variáveis que estão geograficamente mais próximas umas das outras podem ser mais semelhantes entre si do que aquelas que estão mais distantes. Esse fenômeno é chamado de autocorrelação espacial (O'Sullivan; Unwin, 2010). A autocorrelação espacial é inerente aos subsistemas de uso do solo e de transportes, bem como do indicador de acessibilidade. De acordo com O'Sullivan e Unwin (2010) um problema em lidar com a autocorrelação em dados territoriais é que os dados não são simplesmente amostras, mas sim a representação de toda a população. Como o interesse é em se entender a área de estudo, as análises são baseadas na população como um todo e não em se fazer inferências a partir de amostras. Uma das soluções sugeridas pelos autores é a de se incluir na análise o processo que hipoteticamente gerou os padrões de autocorrelação.

3.4 Considerações finais

De acordo com o que foi revisado neste Capítulo, as modelagens realizadas por Garcia (2018) e Sousa (2019) utilizaram o ferramental de inferência estatística para investigar as relações causais entre a acessibilidade e seus determinantes, bem como o efeito da acessibilidade sobre a mobilidade. Porém, a utilização da inferência estatística não possibilita o devido controle das possíveis fontes de endogeneidade. Mais que isso, a utilização desse ferramental guiado apenas pelos resultados dos dados pode levar a interpretações erradas sobre os resultados das estimativas.

Como alternativa, foi realizada uma revisão sobre as bases da teoria da inferência causal, que traz como centro da análise de causalidade a compreensão conceitual sobre o fenômeno. As hipóteses elaboradas são utilizadas para se compor o diagrama causal, permitindo o melhor entendimento tanto das relações direitas, quanto das relações indiretas.

Por exemplo, na análise de Garcia (2018), as características dos indivíduos não foram levadas em consideração ao se estimar as relações entre a acessibilidade e seus determinantes. Para se investigar a problemática das desigualdades socioespaciais na acessibilidade em grandes cidades brasileiras, o efeito da classe socioeconômica dos indivíduos deve ser levado em consideração, assim como visto foi visto no Capítulo 2. Já na análise de Sousa (2019), alguns dos indicadores não apresentaram coeficientes significativos quando utilizados para explicar a acessibilidade, mesmo que tenha sido verificada a existência de correlação entre eles e a acessibilidade. Possivelmente, esses indicadores possuem uma relação indireta com a acessibilidade, gerando uma influência que não foi considerada na análise. Assim, a teoria da inferência causal permite uma melhor compreensão sobre o fenômeno, sendo possível identificar as possíveis fontes de viés e interpretar os resultados de uma modelagem com mais clareza.

4 PROPOSTA METODOLÓGICA DE ANÁLISE DA CAUSALIDADE ENTRE ACESSIBILIDADE E MOBILIDADE URBANA

As propostas de diagnóstico estratégico das desigualdades na acessibilidade contam com as etapas de caracterização e diagnóstico, como foi descrito na seção 2.3. Enquanto a caracterização realiza uma análise exploratória dos dados, o diagnóstico busca entender as relações de causalidade entre as variáveis. A teoria da inferência causal tem como base a análise a priori sobre o fenômeno em estudo. Deve-se elaborar uma base conceitual sobre as relações de interesse, a partir da qual se chega em um diagrama causal. Dessa forma, este Capítulo tem como foco a elaboração de uma metodologia para análise das relações de causalidade no diagnóstico estratégico da problemática da acessibilidade e mobilidade urbana, que também inclui passos focados na exploração dos dados e formação dos indicadores, atingindo assim o objetivo específico (c).

O método proposto consiste em estabelecer e analisar as relações causais entre as desigualdades socioespaciais na acessibilidade aos empregos, seus determinantes e seus efeitos nos padrões de mobilidade no nível estratégico do planejamento. As restrições ao acesso podem ser diferentes para diferentes atividades. Por exemplo, pode existir uma distribuição espacial mais igualitária de escolas de ensino básico em uma área de estudo do que a distribuição de locais de ensino médio. Dessa forma, as restrições à acessibilidade ao ensino básico podem ser locais, enquanto àquelas para o ensino médio podem abranger maiores porções do território. O acesso aos empregos foi escolhido neste trabalho por estar bastante associado às desigualdades socioespaciais, já que essa é uma atividade obrigatória para a maioria da população adulta e gera influencia nas desigualdades de renda.

Esta proposta metodológica é baseada na proposta de Siqueira (2020), que possui como apoio a teoria da inferência causal de Pearl (2000). A metodologia de Siqueira (2020) é baseada em cinco etapas principais, que são resumidas a seguir:

a) Metodologia de coleta e tratamento dos dados - tem como objetivo coletar as variáveis necessárias para formar o banco de dados que será utilizado ao longo da aplicação do método. O banco de dados preliminar passa por uma correção do viés de seleção, formando o banco consolidado.

b) Formulação das hipóteses de causalidade - a partir de uma revisão sobre o fenômeno em estudo, é elaborado um mapa mental cujo objetivo é apresentar as hipóteses que justificam as relações de causa-efeito entre as variáveis analisadas. O mapa mental leva à elaboração de um diagrama causal, que teve seus conceitos básicos apresentados na seção 3.4

desta dissertação.

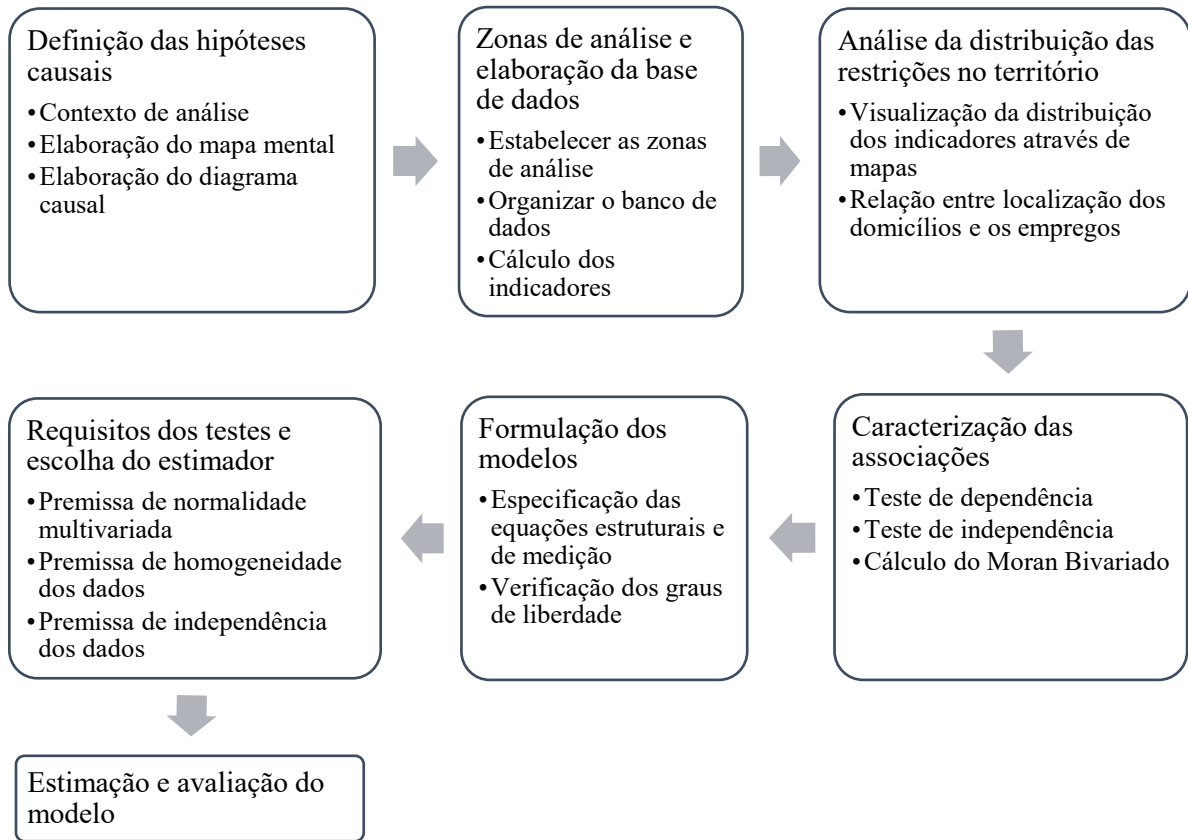
c) Caracterização das associações - é medida a correlação entre cada par de variáveis adjacentes no diagrama causal, bem como a independência entre as variáveis endógenas.

d) Formulação dos modelos estatísticos - as afirmações de d-separação presentes no diagrama causal são formuladas e testadas através de modelos estatísticos, tendo o autor recomendado os modelos SEM por possibilitarem a inclusão de variáveis latentes na modelagem. Assim, são especificados os modelos estruturais e de medição, além de serem verificadas algumas das hipóteses auxiliares relacionadas com a modelagem SEM (normalidade multivariada, homogeneidade e independência).

e) Estimação dos modelos - tem o objetivo de estimar os modelos estatísticos formulados na etapa anterior, adotando as estratégias necessárias para que seja possível relaxar as premissas que não forem atendidas.

A Figura 18 ilustra as principais etapas que compõem a proposta metodológica deste trabalho.

Figura 18 – Etapas do método proposto



Fonte: Elaborado pela autora.

4.1 Proposta metodológica

4.1.1 Definição das hipóteses causais

A primeira etapa desta proposta tem como objetivo estabelecer as hipóteses causais da análise e foi dividida em três partes principais, sendo elas: a contextualização da análise; a elaboração do mapa mental; e a elaboração do mapa mental. A teoria da inferência causal é centrada na compreensão do fenômeno e no estabelecimento de hipóteses de causa-efeito através do conhecimento conceitual. Para os fenômenos que compõem as desigualdades socioespaciais na acessibilidade às oportunidades de trabalho, o contexto de análise inclui a distribuição histórica de empregos, domicílios e infraestrutura de transportes. Deve-se distinguir como esse processo ocorreu para as diferentes classes socioeconômicas.

O planejamento urbano integrado centrado na acessibilidade parte da premissa de que o objetivo da mobilidade é efetivar o engajamento de pessoas nas atividades que desejam

realizar através da superação das resistências de deslocamento nas redes de transportes. Essas resistências, quando investigadas no nível estratégico, são fruto das relações de demanda e oferta nos subsistemas urbanos de atividades, uso do solo e transportes. Dessa forma, assim como foi apresentado pela revisão do Capítulo 2 e ilustrado pela representação conceitual da Figura 11, as desigualdades na acessibilidade são formadas devido aos problemas de distribuição desigual das características dos subsistemas. Para o subsistema de uso do solo, deve ser realizada uma análise conceitual sobre o histórico de formação dos centros das cidades, buscando identificar quais os principais problemas enfrentados para o alcance dos empregos pela população de cada região, distinguindo-se entre as classes socioeconômicas. Já para o subsistema de transportes, devem ser identificadas as regiões onde se encontram os melhores e piores níveis de infraestrutura de transporte público, bem como de malha viária. Também deve ser identificada a proximidade entre essas infraestruturas e os domicílios, entendendo quais as principais dificuldades enfrentadas por cada classe socioeconômica na utilização desses recursos.

As hipóteses causais formuladas serão a base para a elaboração de um mapa mental, representando graficamente as hipóteses traçadas para as relações causa-efeito. De acordo com Siqueira (2020), o mapa mental deve estabelecer relações, através de símbolos e ramificações, que mostrem que o aumento (ou redução) em uma característica x leva ao aumento (ou redução) de outra característica y . Os diagramas causais são parte do processo de inferência causal proposto por Pearl (2000) e foram apresentados na seção 3.4.1. Sua construção se baseia no mapa mental das hipóteses de causalidade dos fenômenos analisados. Dado que o mapa mental apresenta uma explicação teórico-conceitual abrangente sobre os fenômenos, no diagrama causal devem ser identificados apenas os caminhos que contenham as hipóteses de pesquisa e as variáveis de controle, que são os caminhos de *front* e *back-door*, respectivamente. As variáveis exógenas serão aquelas que representam a delimitação dos fenômenos de interesse, não sendo identificadas suas causas.

Os elementos descritos no mapa mental devem ser representados no diagrama causal através de indicadores, que ocuparão os vértices do diagrama, sendo as relações causais indicadas pelas setas. Deve-se distinguir, através da simbologia utilizada para representar os vértices, entre as variáveis observadas e as latentes. As primeiras geralmente são representadas por retângulos, enquanto às últimas por elipses. Para poder diagnosticar causalidade, os indicadores devem ser os mais simples de se interpretar. Indicadores complexos podem capturar diferentes elementos, sendo que cada uma pode estar sofrendo um processo causal diferente, levando a estimativas enviesadas.

4.1.2 Zonas de análise e elaboração da base de dados

A segunda etapa da proposta possui o objetivo de identificar as zonas de análise, delineando assim a área de estudo e a fonte dos dados, além de estabelecer a base de dados. Para a espacialização dos dados, devem ser estabelecidas as zonas de análise. Entre os critérios para essa escolha, podem-se citar dois a partir do trabalho de Lima (2017). O primeiro se trata da homogeneidade socioeconômica dentro da zona. Esse critério se adequa bem a análise, já que o objetivo do diagnóstico das desigualdades está intimamente ligado às características socioeconômica dos indivíduos. Assim, os dados sobre os indivíduos devem ser divididos em classes, sendo o critério a renda ou outra classificação adequada à análise. O segundo critério está ligado a forma de agregação dos dados. Dados sociodemográficos estão em nível da área de censo, enquanto alguns dados de atividades e viagens estão em nível de bairro (Lima, 2017). Assim, o tamanho das zonas devem ficar entre a área do setor censitário e a área do bairro.

São indicados, pelo menos, os seguintes dados agrupados nas zonas para comporem a base:

- População: quantidade de indivíduos divididos por renda, escolaridade, idade, cor, sexo e principal atividade que atuam (como estudante, emprego formal ou informal, aposentado);
- Uso do solo: quantidade de empregos de acordo com a renda ou escolaridade aos quais se destinam e quantidade de domicílios divididos por classe social;
- Transportes: representação da malha viária, de acordo com o número de faixas e modo ao qual se destina; quantidade de pontos de TP; frequência das linhas de TP; pontos de integração de TP. Também é importante identificar o ano de implantação da característica registrada;
- Mobilidade: número de viagens de cada domicílio, por horário de saída, modo, destino e horário de chegada.

Esses dados são geralmente encontrados de forma aberta. Dados sobre a população podem ser obtidos através do censo demográfico e outras pesquisas como o a Pesquisa de Orçamentos Familiares (POF). Os locais de atividades estão disponíveis através dos microdados da Relação Anual de Informações Sociais (RAIS). Dados do subsistema de transportes podem ser encontrados nos sites de prefeituras ou secretarias ligadas ao transporte e mobilidade, como também através da lei de acesso à informação. Dados dos padrões de

mobilidade podem ser obtidos através de pesquisas domiciliares de origem e destino na cidade. Outras fontes podem ser consultadas para se obter dados de infraestrutura e mobilidade sobre outros modos de transportes, como o ativo.

É relevante que os indicadores de mobilidade não se confundam com os de outras partes do sistema, como a infraestrutura de transporte, as características do indivíduo ou a própria acessibilidade, situação comum na literatura. O que se busca é representar as características dos padrões de viagens observados. De acordo com Saloman e Moktharian (1998), a quantidade de movimento realmente realizada pelo indivíduo é medida pelos indicadores de demanda, representados pela quantidade de viagens, distância ou tempo, por variados modos, categoria que Garcia (2016) considerou como a mais adequada para se medir mobilidade.

É possível encontrar na literatura uma variada gama de indicadores de acessibilidade. Geralmente, devido a sua forma de mensuração, esses indicadores apresentam autocorrelação espacial. Por exemplo, o indicador de oportunidades cumulativas é um dos mais usados por agências e em estudos de transportes (Geurs; Van Wee, 2004; Pereira; Herszenhut, 2022) e adequado para análise de desigualdades, seja entre zonas ou entre modos de transporte (Golub; Martens, 2014). Uma de suas maiores vantagens é a facilidade em se calcular e comunicar. Eles medem a quantidade de oportunidades que podem ser alcançadas dentro de um certo limite de custo com a viagem, ou o custo de se alcançar um certo número de oportunidades. Esse custo pode ser monetário, temporal ou alguma outra medida de impedância, como distância. Um exemplo pode ser visto na Equação 5, onde: A_i é a acessibilidade; O_j são as oportunidade na zona de destino j ; $f(c_{ij})$ é a função binária que assume os valores 0 ou 1, a depender do custo de deslocamento entre a origem i e o destino j ; e C é o limite de custo de deslocamento estabelecido.

$$A_i = \sum_j O_j \times f(c_{ij}) \quad (5)$$

$$f(c_{ij}) = \begin{cases} 1 & \text{se } c_{ij} \leq C \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Existem outros indicadores semelhantes aos de oportunidades cumulativas, como os gravitacionais. Eles calculam a quantidade de oportunidades que podem ser alcançadas a partir de uma certa origem em relação aos demais destinos da área de estudo, considerando, através de uma função de impedância, que oportunidades com maior dificuldade de acesso

possuem menor peso na acessibilidade. Porém, existe uma maior dificuldade em se interpretar seus resultados, pois não possuem um significado claro, sendo úteis como meio de se comparar acessibilidade entre locais (Levinson; King, 2020). Os indicadores de oportunidades cumulativas e os gravitacionais foram adaptados para incluir a competição pelas oportunidades, dando origem a uma série de novos indicadores (Geurs; Van Wee, 2004). Esse tipo de indicador é mais complexo de se calcular e se interpretar, sendo preferível o uso de indicadores mais simples quando não há grande diferença no nível de contribuição ofertada (Pereira; Herszenhut, 2022).

Já os indicadores baseados em utilidade derivam da teoria econômica da utilidade, possuindo como premissa que o padrão de viagens escolhido pelas pessoas é aquele que lhes oferece o maior benefício (Geurs; Van Wee, 2004). Uma das abordagens utilizadas deriva de Ben-Akiva e Lerman (1985), que chamaram o denominador do modelo *logit* multinomial de medida de acessibilidade, também conhecido como *logsum*. O indicador representa o somatório dos valores atribuídos a um conjunto de escolhas de viagens. Esse indicador é mais complexo de ser calculado, podendo ser necessária a utilização de modelagem computacional para sua mensuração.

4.1.3 Análise da distribuição das restrições no território

A terceira etapa desta proposta tem como objetivo a análise exploratória sobre o fenômeno. Deve ser investigado como os subsistemas de uso do solo e de transportes se distribuem pelo território através dos dados coletados no passo anterior e agregados nas zonas. Inicia-se por uma análise visual, ao se exibir um mapa dos dados de densidade de empregos distribuídos em intervalos iguais. Essa divisão dos dados permite observar onde estão os locais que possuem os maiores e o menores níveis de oportunidades de trabalho. Esses mapas, em conjunto com análises dos valores agregados por região, irão contribuir para a identificação das centralidades. Uma centralidade é geralmente definida de forma qualitativa, sendo considerada como o local onde historicamente estão concentradas as atividades, com grande variedade e voltadas para diversas classes sociais. Os subsistemas de transportes costumam ser direcionados para o alcance dessas centralidades.

Para verificar a hipótese de *spatial mismatch* dos grupos vulneráveis, sugere-se a apresentação da distribuição dos domicílios sobre o território, de acordo com a classe socioeconômica. A desigualdade socioespacial se apresenta ao existir concentração de uma ou mais classes sociais em determinadas regiões do território, especialmente quando as classes

mais privilegiadas se encontram próximas às centralidades, enquanto as classes mais vulneráveis estão em locais com escassez de atividades. A distribuição das características do subsistema de transportes e sua relação com os domicílios também deve ser analisada de forma espacial. Locais mais próximos às centralidades e em áreas com população de alta renda costumam apresentar maior volume de infraestrutura de transportes, enquanto áreas mais periféricas e com população de baixa renda apresentam menores níveis dessas características.

4.1.4 Caracterização das associações

O objetivo da quarta etapa desta proposta é o de identificar se as correlações entre as variáveis estão de acordo com o que se é esperado pelas hipóteses elaboradas. Siqueira (2020) argumenta que antes de se formular os modelos estatísticos, deve-se caracterizar as relações associativas representadas nos diagramas causais, pois se há causalidade entre as variáveis, há correlação, atendendo à chamada premissa de fidelidade. São então realizados testes de dependência e independência, descritos a seguir.

O teste de dependência deve ser conduzido para cada par de variáveis adjacentes no diagrama causal. A hipótese nula é de que não existe correlação entre as variáveis ($H_0: \rho_{xy} = 0$). Dessa forma, a hipótese nula ser rejeitada (valor-p menor que o nível de significância α) implica na existência de evidências que apontam para correlação entre as variáveis, apoiando as relações do diagrama causal.

Já o teste de independência deve ser aplicado às variáveis exógenas que são incondicionalmente independentes. Nesse caso, a hipótese nula é a mesma que para o teste anterior, porém a rejeição da hipótese nula implicaria na existência de evidências de que esta relação no diagrama causal foi representada de forma incorreta. Ou seja, as duas variáveis podem não ser independentes. Nesse caso, pode-se adotar a utilização de setas bidirecionais, já que a explicação sobre as relações entre variáveis exógenas não precisa ser representada na pesquisa.

Outra correlação que também deve ser medida corresponde à correlação espacial de um indicador na zona, com o de sua causa nas regiões vizinhas, através do índice de Moran Bivariado. O Índice de Moran Bivariado é uma medida da correlação espacial entre uma variável em certa localidade e outra variável em regiões próximas (Anselin; Syabri; Smirnov, 2002), sem levar em consideração a correlação entre as duas variáveis na mesma localidade. Ou seja, essa medida difere da correlação não espacial, que mede a correlação entre duas

variáveis na mesma localidade. Como as relações de acessibilidade e mobilidade possuem uma interação no espaço, é de interesse verificar não só a relação dentro da zona, mas também em seus arredores. É esperado que, devido a autocorrelação espacial dos indicadores, os valores encontrados para a correlação espacial e não espacial sejam semelhantes. Porém, pode ocorrer uma correlação forte (fraca) entre as variáveis na mesma zona, mas uma correlação fraca (forte) entre a variável efeito na zona e sua causa nas zonas vizinhas. Por exemplo, as distâncias médias percorridas pela população de baixa renda podem apresentar maior relação com a acessibilidade das zonas vizinhas do que com a acessibilidade da própria zona, já que essa classe geralmente se encontra em bairros com poucos empregos.

4.1.5 *Formulação dos modelos*

A quinta etapa da proposta tem como objetivo traduzir as relações no diagrama causal em modelos de equações. O diagrama causal fornece todos os critérios de d-separação que deverão ser testados através da formulação de modelos estatísticos. Recomenda-se os modelos SEM por se mostrarem adequados para representar fenômenos complexos. Através deles é possível formular relações diretas e indiretas entre as variáveis, além de ser possível utilizar variáveis latentes, como argumentado no Capítulo 3. Além disso, esses modelos testam a própria estrutura hipotetizada. Ou seja, através deles é possível verificar se as relações entre as variáveis foram descritas adequadamente. Utilizar variáveis latentes pode ser útil para representar conceitos como a forma urbana ou a infraestrutura de transportes, já que pode haver várias outras influências não consideradas no modelo, sendo necessário mais de um indicador para compensar os ruídos inerentes à coleta dos dados.

O primeiro passo é a especificação das equações estruturais e das variáveis latentes. Nas equações estruturais, para cada variável endógena será elaborada uma equação identificando todas as suas causas diretas. A relação de independência incondicional entre as variáveis será explicada através de uma covariância fixada a zero. As variáveis latentes podem ser de dois tipos: as reflexivas e as formativas. As reflexivas são vistas como causas dos seus indicadores, sendo representadas através dos modelos de medição nos quais a latente é a variável explicativa e os indicadores são as variáveis explicadas. Já as latentes formativas são consideradas efeitos dos seus indicadores, sendo representadas através de equações estruturais, onde a latente é a variável explicada e os indicadores são as explicativas. Assim, a escolha do tipo de latente depende da interpretação que se faz sobre a relação entre a latente e seus indicadores. Siqueira (2020) recomenda que, sempre que possível, deve-se dar prioridade

à utilização de latentes reflexivas. Para utilizar uma variável formativa, todos os seus indicadores devem ser especificados, ou serão obtidas estimativas incompletas. Já as variáveis reflexivas podem ser especificadas apenas com um conjunto suficiente de indicadores.

Especificados os conjuntos de equações, faz-se necessário verificar se a estrutura é identificada. Uma estrutura identificada é aquela em que existem informações suficientes para se obter a estimativa para os dados. Essa verificação acontece através da mensuração dos graus de liberdade (df), como ilustrado pela Equação 7.

$$df = \frac{n(n + 1)}{2} - p \quad (7)$$

Onde n representa a quantidade de variáveis observadas. O primeiro termo da equação diz quantas covariâncias únicas existe na matriz de covariância; p é o número de parâmetros a serem estimados (soma dos coeficientes estruturais, covariâncias e variâncias). Assim, se houver mais parâmetros do que elementos na matriz de covariância, não é possível realizar a estimativa, sendo o modelo considerado identificado se o valor dos graus de liberdade for maior do que 1.

4.1.6 Requisitos dos testes e escolha do estimador

A sexta etapa da proposta tem como objetivo testar as hipóteses auxiliares associadas aos modelos de equações estruturais. A escolha do estimador será feita após se verificar: se os dados são normalmente multivariados; se há homogeneidade dos efeitos entre as amostras; e se há independência entre as amostras.

Para se obter normalidade multivariada, as variáveis devem necessariamente ter distribuição normal. Porém, a verificação desse requisito não garante a normalidade multivariada, sendo necessário um teste específico para verificar essa premissa. O teste de Mardia é utilizado para medir assimetria e curtose multivariadas, podendo ser calculado a partir de programas computacionais, como o R (Shipley, 2016). De acordo com Shipley (2016), caso os dados não sejam normalmente multivariados, existem outros tipos de estimadores que podem ser utilizados e estão disponíveis na maioria dos programas comerciais, como o MLM (estimativa robusta de máxima verossimilhança), no R. Também é possível contornar esse problema utilizando maior número de amostras. Como regra geral, pode-se dizer que deve haver cinco vezes mais amostras do que parâmetros livres e que esse

valor deve crescer para dez vezes quando as variáveis não são normalmente multivariadas (Shipley, 2016).

A premissa de homogeneidade entre as amostras nos modelos SEM assume que os dados foram gerados a partir do mesmo processo causal, ou seja, através de um processo homogêneo. Para comparar dados entre diferentes grupos existem os modelos SEM multigrupo, que possuem a capacidade de testar estatisticamente em quais partes dos modelos existem diferenças entre os grupos. Essas diferenças podem ser na força do efeito ou na própria estrutura do modelo. Para o fenômeno da problemática das desigualdades na acessibilidade e mobilidade urbana, assume-se que a classe socioeconômica dos indivíduos é uma característica que influencia nas relações entre as variáveis. Dessa forma, pode existir uma heterogeneidade nos efeitos de acordo com a classe dos indivíduos. Para grupos que possuem a mesma estrutura, o pacote “lavaan” do programa R fornece uma forma bastante simples de estimar os modelos multigrupo.

A premissa de independência entre as amostras pode ser violada devido à autocorrelação espacial, que é encontrada em dados associados ao uso do solo e à infraestrutura dos transportes, já que zonas próximas vão apresentar características mais semelhantes do que as zonas mais distantes. Para lidar com esse problema, pode-se explicitamente incluir as causas da autocorrelação dentro do modelo ou eliminar a correlação ao contar apenas com os valores médios em cada grupo, o que pode reduzir significativamente o tamanho da amostra.

4.1.7 Estimação e avaliação do modelo

Após se escolher o estimador mais apropriado, pode-se então realizar a estimação do modelo, que é o objetivo da sétima etapa desta proposta. Na modelagem SEM existe uma gama de medidas para se testar se os dados são adequados ao modelo hipotetizado. Existem tanto testes globais quanto locais. Os globais são aqueles que testam a estrutura como um todo, comparando a matriz de covariância hipotetizada (Σ) com a matriz de covariância obtida através dos dados (S). Assim, o que se busca é testar se $\Sigma = S$. A medida global mais utilizada para se testar a estrutura é o teste de hipótese de qui-quadrado (X^2). No teste de X^2 , a hipótese nula é que as matrizes hipotetizada e modelada são iguais, sendo a hipótese alternativa que elas são diferentes. Um valor de teste igual a 0 significa que as matrizes são iguais, enquanto um valor de teste máximo apontaria para matrizes completamente diferentes. Nesse caso, o que se quer alcançar é um valor de teste onde a hipótese nula não seja rejeitada, dado

um certo valor de α . Considerando que o χ^2 é sensível ao poder do teste, existem ainda outras medidas para avaliação do ajuste do modelo (*goodness-of-fit*). Uma das pesquisas mais conhecidas na literatura é a de Hu e Bentler (1999), que estabeleceram limites (superiores ou inferiores) de um conjunto de medidas que indicam o quão bem o modelo representa os dados. O método proposto pelos autores é baseado na escolha de pelo menos duas medidas: o *standardized root mean squared residual* (SRMR), suplementado por uma entre as medidas da Tabela 1, que também apresenta a medida de corte sugerida. Porém, assim como alertam estudos posteriores (Fan; Sivo, 2005), essas medidas não devem ser interpretadas como regras inflexíveis, pois também apresentam limitações e podem variar seus resultados de acordo com características como a complexidade do modelo e a quantidade de amostras.

Tabela 1 - Medidas de avaliação de ajuste de modelos SEM de acordo com Hu e Bentler (1999)

Medida	Valor de corte
Standardized root mean squared residual (SRMR)	$\leq 0,08$
Tucker-Lewis Index (TLI)	$\geq 0,95$
Bollen's (1989) Fit Index (BL89)	$\geq 0,95$
Relative Noncentrality Index (RNI)	$\geq 0,95$
Comparative Fit Index (CFI)	$\geq 0,95$
Gamma Hat	$\geq 0,95$
Mc- Donald's Centrality Index (Mc)	$\geq 0,90$
Root mean squared error of approximation (RMSEA)	$\leq 0,06$

Fonte: Elaborado pela autora.

Os testes globais podem rejeitar o modelo hipotetizado não porque todas as relações são inválidas, mas porque podem existir relações locais não corretamente especificadas. Ou seja, existem pares de relações no modelo hipotetizado que não são apoiadas pelos dados. Assim, para se entender quais relações estão mal especificadas, são conduzidos os testes locais. De acordo com Kline (2016), as discrepâncias entre os valores previstos e os observados pelos modelos, chamados de correlações residuais, devem ser menores que $|0,10|$. Ou seja, serão avaliadas as correlações residuais para cada par de relações, observado quais não se adequam ao modelo hipotetizado.

Os resultados podem ser apresentados de forma padronizada ou não-padronizada. A padronização dos coeficientes permite comparar a importância relativa entre as variáveis do modelo, o que facilita a interpretação sobre o efeito causal de uma em relação a outra. Já a não-padronização possui como vantagem a comparação entre os resultados de diferentes amostras de uma mesma população (Schumacker e Lomax, 2010). Como na análise do

fenômeno de desigualdades socioespaciais na acessibilidade e mobilidade urbana se pretende comparar os efeitos entre os determinantes, é sugerida a apresentação dos dados de forma padronizada.

5 ANÁLISE DE CAUSALIDADE DAS DESIGUALDADES SOCIOESPACIAIS NA ACESSIBILIDADE E SEUS EFEITOS SOBRE OS PADRÕES DE MOBILIDADE EM FORTALEZA

De forma a demonstrar a aplicabilidade do método proposto, será realizado um estudo de caso em Fortaleza, contemplando o diagnóstico das desigualdades na acessibilidade e mobilidade para 2020 (cenário pré-pandemia), com dados da pesquisa OD domiciliar de 2019. A análise vai se restringir à acessibilidade de oportunidades de empregos. O objetivo desse diagnóstico é entender como as restrições dos subsistemas do uso do solo, das atividades e dos transportes influenciam nas desigualdades na acessibilidade aos empregos, bem como qual o impacto dessas desigualdades na mobilidade por motivo trabalho.

5.1 Aplicação da proposta

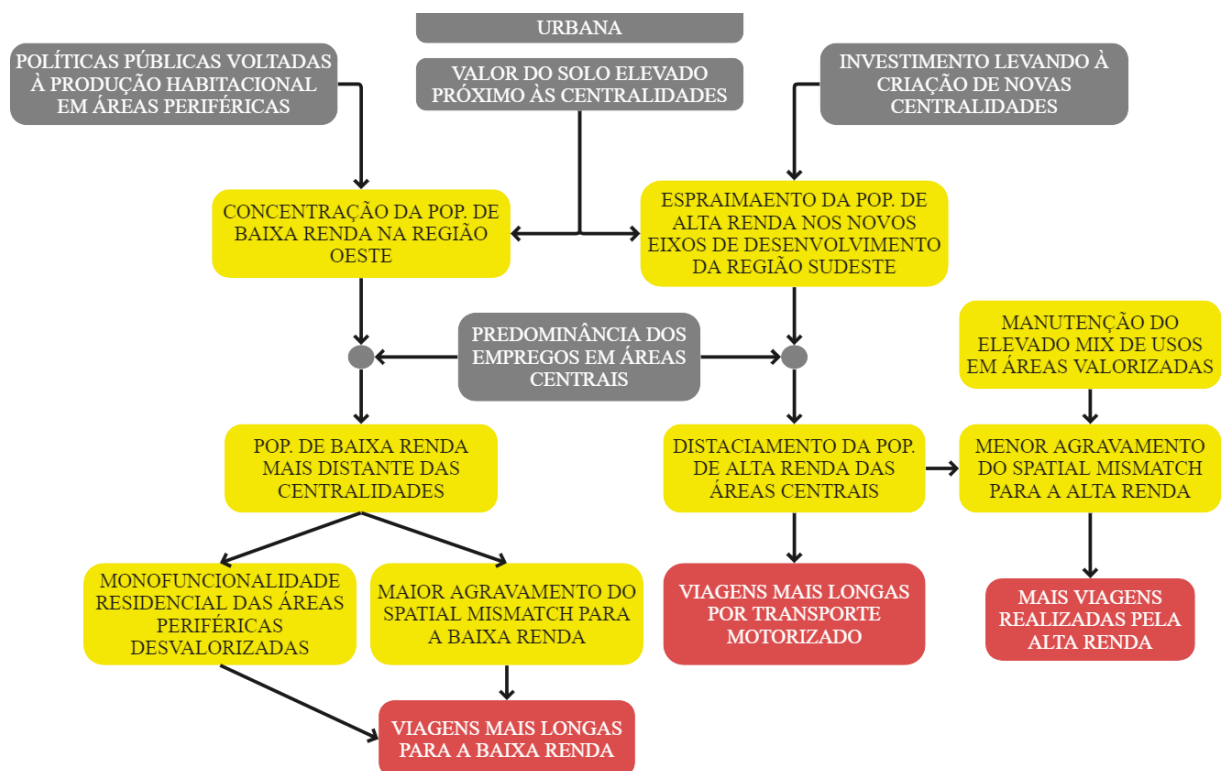
5.1.1 Definição das hipóteses causais

O município de Fortaleza possui mais de 2,4 milhões de habitantes (IBGE, 2022), sendo a quarta maior cidade do Brasil. O desenvolvimento urbano de Fortaleza foi caracterizado por um notável fenômeno de segregação residencial, que afetou particularmente os grupos socioeconômicos mais vulneráveis, resultando em seu crescente afastamento das oportunidades de emprego e atividades sociais (Freitas; Pequeno, 2015). Essa condição, característica do *spatial mismatch*, resultou em níveis de acesso significativamente menores para as camadas de baixa renda, com consequências prejudiciais para sua qualidade de vida (Rolnik; Nakano, 2009). Apesar do surgimento de novos centros urbanos nas últimas décadas, esses esforços não conseguiram reduzir de maneira eficaz a forte concentração de oportunidades de emprego na região central da cidade (Castro *et al.* 2021). Como resultado, tem-se observado uma intensificação do processo de periferização da população de baixa renda, que agora ocupa predominantemente as periferias das áreas Noroeste e Sudoeste da cidade.

É possível observar o processo de autosegregação das camadas de maior renda, como discutido por Villaça (1998). Esses grupos têm se deslocado para as regiões situadas no vetor Sudeste da cidade, muitas vezes próximas a equipamentos públicos e privados, localizados em solo constantemente valorizado. Isso torna economicamente inviável a ocupação dessas áreas pela população de baixa renda. Essa configuração espacial resulta no

que Lima *et al.* (2021) descrevem como uma "Cidade dos Ricos", onde a maior parte das oportunidades está concentrada, proporcionando níveis mais elevados de acessibilidade, e uma "Cidade dos Pobres", que é monofuncional e apresenta níveis significativamente mais baixos de acesso às oportunidades. A concentração de empregos na região central e o desbalanceamento entre oferta e demanda por habitação, levando ao *spatial mismatch* da população de baixa renda, foram identificados. De acordo com esse cenário, bem como as premissas apresentadas pela representação conceitual da Figura 11 para as inadequações do uso do solo, foi elaborado o mapa mental da Figura 19. Foi compreendido que a falta de oportunidades nas regiões onde a população de baixa renda habita é um dos determinantes para a realização de viagens mais longas para essa classe. Apesar de também ter havido a descentralização da alta renda, o que aumentaria as distâncias percorridas, essa parcela da população ainda se encontra em locais privilegiados quando comparados aos locais de residência da baixa renda.

Figura 19 - Mapa mental das inadequações no uso do solo e sua relação com os padrões de mobilidade



Fonte: Elaborado pela autora.

Também é possível encontrar desigualdade na distribuição da oferta de transportes em Fortaleza (Sousa, 2019). O investimento no sistema de transportes das últimas décadas

levou a construção de malha viária (vias expressas e corredores arteriais) nos setores Sudeste e Nordeste, ampliando a conexão dessas regiões com o centro. Já a oferta de transporte coletivo foi expandida nas regiões Noroeste e Sudoeste, tanto através de linhas rodoviárias quanto ferroviárias, também realizando uma ligação centro-periferia. A rede de transporte público por ônibus possui uma configuração tronco-alimentadora, aumentando o tempo de viagem de quem vem das periferias, pois precisam passar pelos terminais físicos de integração. Assim, enquanto o setor Leste possui melhores condições de malha viária, permitindo o acesso aos empregos em uma média de tempo de 20 minutos, no lado Oeste o deslocamento até os empregos por ônibus gasta em média 75 minutos. Essa melhor infraestrutura do setor Oeste beneficia ainda mais novos investimentos, aumentando a geração de empregos nessas regiões (Lima *et al.* 2021).

Outra consequência é a valorização fundiária da região, reforçando a expulsão do setor de menor renda para as regiões periféricas (Andrade *et al.* 2020). Dessa forma, a desigualdade tende a aumentar, já que a população de baixa renda se vê segregada em locais com poucos empregos e acessibilidade, enquanto a população de alta renda reside nos locais com melhores acessos e que estimula a criação de mais empregos. O distanciamento entre população e empregos pode ser apontado como o motivo pela crescente preferência pelo transporte motorizado individual. A demanda por transporte coletivo entrou em declínio na última década, diminuindo a média de passageiros transportados em cerca de 14% entre 2014 e 2018 (PASFOR, 2020). Mesmo com as melhorias realizadas nos últimos anos na oferta do transporte coletivo, o número de viagens por esse modo diminuiu, enquanto aumentaram as viagens por transporte motorizado individual, inclusive entre as classes de menor renda (Pinto *et al.* 2022). De acordo com os dados da OD de Fortaleza de 2019 (PASFOR, 2020), o modo mais utilizado pelos indivíduos de mais baixa renda (C, D e E) é o ativo, enquanto os de maior renda (A e B) utilizam o transporte motorizado individual na maior parte de suas viagens, como pode ser visto na Tabela 2. É possível notar a desigualdade entre as classes na escolha pelos modos quando apenas 30,48% das viagens das classes C, D e E são realizadas por transporte individual privado, enquanto esse valor é de 70,83% para a classe A. A Tabela 2 também mostra o tempo médio das viagens (em minutos) por cada modo, em cada classe. É possível notar que, para todas as classes, o tempo médio das viagens por transporte motorizado coletivo é quase o dobro que o do individual. Ainda, através dos modos motorizados, quanto menor a renda, mais longas são as viagens.

Tabela 2 - Proporção de viagens e tempo médio viajado por cada classe em diferentes modos

	VIAGENS (%)			TEMPO MÉDIO (MIN)		
	A	B	C, D e E	A	B	C, D e E
Ativo	15,57	23,31	43,16	14,0	13,6	15,5
Motorizado coletivo	13,43	20,02	25,89	41,8	47,9	53,6
Motorizado individual	70,83	56,38	30,48	23,8	25,7	26,3
Outros	0,17	0,30	0,46	22,7	14,8	13,7

Fonte: Elaborado pela autora.

Os dados da pesquisa ainda mostram que a maior porcentagem das viagens de base domiciliar possuem como motivo o trabalho, sendo de 37,6%, 32,8% e 34,8% para as classes A, B e C, D e E, respectivamente. Para realizar viagens por esse motivo, enquanto a classe A utiliza majoritariamente o transporte motorizado individual (71,9%), a classe C, D e E utiliza mais o transporte motorizado coletivo (37,4%), seguido pelo individual (34,7%). De acordo com Pinto *et al.* (2021), mesmo após as melhorias na rede de transporte público, não houve diferença na demanda entre os modos motorizados, o que os autores atribuem ao fato de que também houve investimento na malha viária, não havendo benefícios trazidos pelas intervenções na oferta de uma rede sobre a outra.

Assim, é possível notar os problemas de desigualdade na distribuição de infraestrutura de malha viária e transporte coletivo, como apresentado pela representação conceitual da Figura 11. As regiões que apresentam essas diferenças foram identificadas e descritas, além de ter sido encontradas melhorias nessas desigualdades, sendo esse cenário ilustrado pelo mapa mental da Figura 20.

Figura 20 - Mapa mental das inadequações nos transportes e sua relação com os padrões de mobilidade



Fonte: Elaborado pela autora.

A partir da análise conceitual e dos mapas mentais resultantes, é possível elaborar hipóteses de relações causa-efeito para as desigualdades socioespaciais na acessibilidade aos empregos e seus efeitos sobre a mobilidade, em nível estratégico, para a cidade de Fortaleza. A Figura 21 ilustra essas relações, sendo feita a distinção entre as hipóteses de interesse e as de controle através do diagrama causal, como descrito a seguir.

Para o subsistema de uso do solo, as restrições à acessibilidade são devido à distribuição dos empregos. Quanto mais empregos estiverem disponíveis em uma zona e próximo a ela, mais acessível será essa zona (H1). Para o subsistema de transportes, as restrições à acessibilidade são caracterizadas pela oferta de infraestrutura de malha viária e de transporte coletivo. A melhoria na infraestrutura diminui os tempos de viagem, permitindo que mais empregos sejam alcançados em menos tempo, melhorando assim a acessibilidade (H2).

Para a mensuração da acessibilidade, as características do uso do solo e transportes das zonas vizinhas também são relevantes. Como a distância às centralidades influencia também nessas zonas, deve-se considerar um efeito direto da distância na acessibilidade da zona, que busca representar o impacto das zonas vizinhas na acessibilidade. Essa relação é considerada uma relação de controle (*back-door*) pois sua interpretação não

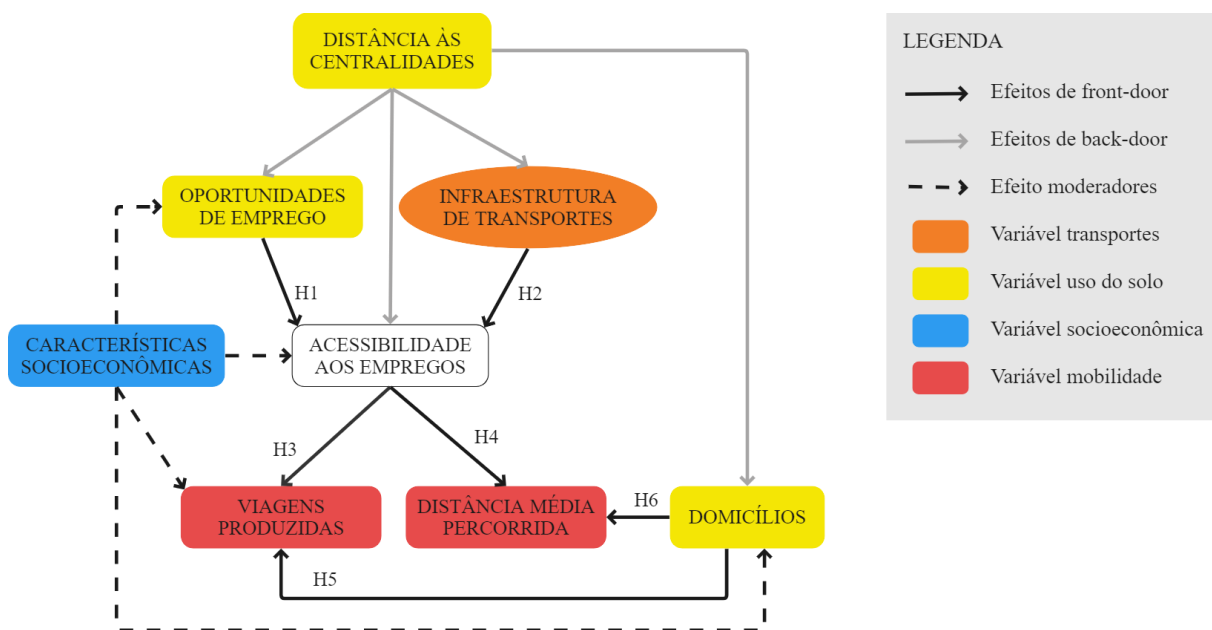
fica completamente clara, mas pode gerar um viés se não controlada. A distância entre uma determinada zona e as zonas centrais possui um papel fundamental na distribuição das características do uso do solo e transportes. Nas zonas centrais estão a maior porcentagem dos empregos, que vão diminuindo de acordo com a distância até esses centros. Da mesma forma, os melhores níveis de infraestrutura para transporte estão localizados nos centros, ou próximos a eles, e diminuem em direção da periferia. Como as demais causas para as variáveis de empregos e de infraestrutura não estão, pois não são relações de interesse, os efeitos das distâncias às centralidades sobre essas variáveis são apenas de controle.

Quanto maior a facilidade em se alcançar oportunidades a partir de uma zona, ou seja, quanto melhor a acessibilidade, maior será o número de viagens produzidas naquela zona (H3). A acessibilidade também pode influenciar nas distâncias percorridas, pois quanto mais oportunidades estiverem disponíveis próximas às zonas, menor a distância média percorrida pelos indivíduos daquela zona (H4). Apesar disso, dado o mesmo nível de acessibilidade, zonas com maior número de pessoas tanto vão gerar maior número de viagens (H5), como pode gerar maiores distâncias (H6), já que vai existir uma competição pelos empregos, sendo que quanto maior a competição (domicílios), mais longe os indivíduos precisaram viajar para encontrar oportunidades. Devido aos desequilíbrios no subsistema de uso do solo, que levam ao aumento dos valores dos terrenos próximos às oportunidades de empregos, a distância entre uma determinada zona e as zonas centrais vai ditar a quantidade de domicílios, sendo essa também uma relação representada apenas para controle. Levando isso em consideração, espera-se uma relação inversa entre as distâncias às centralidades e os domicílios de alta renda, já que essa classe pode residir nos locais mais privilegiados; e uma relação direta com os domicílios de baixa renda, que é empurrada para a periferia devido aos altos valores do solo.

Assim, a quantidade de domicílios encontradas na zona vai depender da classe socioeconômica, já que as pessoas de alta renda podem optar por áreas mais valorizadas, enquanto as de baixa renda vão habitar em áreas mais distantes das oportunidades. As características socioeconômicas dos indivíduos também vão afetar nas oportunidades disponíveis e na acessibilidade aos empregos devido à renda, já que certos empregos são direcionados à certas classes sociais. A renda também influencia na quantidade de viagens produzidas, sendo observado que indivíduos de alta renda produzem mais viagens que aqueles de baixa renda. O modo utilizado para o transporte gera influência na acessibilidade, já que diferentes modos possuem diferentes velocidades e restrições, possuindo assim diferentes tempos de viagem para alcançar um mesmo número de oportunidades. A disponibilidade na

oferta de infraestrutura também varia de acordo com o modo de transporte, sendo as características da malha viária mais ligadas ao transporte motorizado individual e as características do transporte público ligadas ao modo coletivo. Dessa forma, o diagrama causal apresentado na Figura 21 representa as relações para duas modelagens, que se diferenciam pelos dados de infraestrutura, acessibilidade e mobilidade, que foram coletados para o transporte por modo motorizado coletivo e por modo motorizado individual.

Figura 21 - Diagrama causal da problemática das desigualdades na acessibilidade e mobilidade por motivo trabalho na cidade de Fortaleza



Fonte: Elaborado pela autora.

5.1.2 Zonas de análise e construção da base de dados

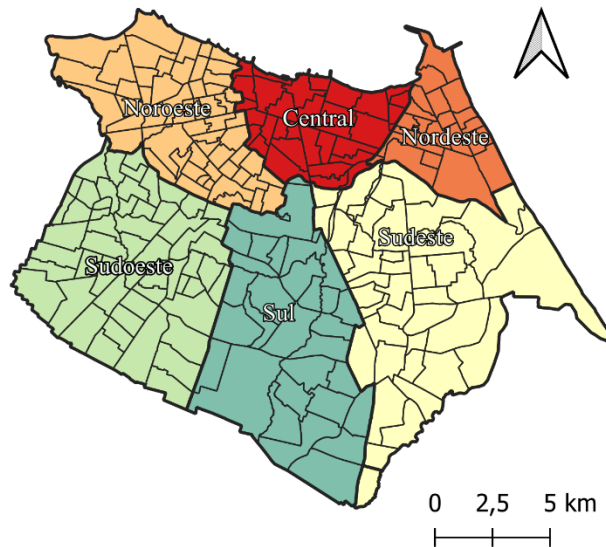
As variáveis utilizadas para a representação de cada indicador da Figura 21 foram espacializadas e agregadas em 232 zonas de tráfego, como proposto por Lima (2017) e ilustrado na Figura 22. Os indicadores foram mensurados a partir de dados observacionais, sendo apresentados na Tabela 3. Os indicadores de acessibilidade e do subsistema de uso do solo escolhidos permitem a divisão em grupos socioeconômicos e modo de transporte. Os modos escolhidos foram os de transporte motorizado coletivo e de individual, já que esses são os que melhor representam as viagens realizadas entre zonas, que costumam ser mais longas que as viagens intrazonais.

Foi escolhido um indicador de oportunidades acumuladas para representar a acessibilidade. Indicadores mais complexos, como os gravitacionais e os de utilidade, que

carregam um maior número de premissas em sua mensuração, podem conter influência de variadas fontes, que se associam e dificultam a interpretação das suas causas e efeitos. Os indicadores de oportunidades acumuladas são os mais simples de se interpretar, possuindo influência tanto do subsistema de transportes quanto de uso do solo. Além disso, são de fácil mensuração e permitem o cálculo da acessibilidade ao nível de zona. Assim, esse é o tipo de indicador mais adequado para se estabelecer relações causais ao nível agregado. O indicador foi mensurado e disponibilizado no site do projeto Acesso a Oportunidades, do IPEA (Pereira *et al.* 2022), sendo especificado como a quantidade de empregos que podem ser acessados a partir de um certo ponto e no horário de pico, em tempo de viagem de até 15 minutos para o transporte motorizado individual e de 30 para o transporte coletivo. O tempo de 15 minutos foi escolhido para a acessibilidade por transporte motorizado individual porque no tempo de 30 minutos os empregos de quase todas as zonas poderiam ser alcançados, o que geraria pouca variação entre uma zona e outra. O tempo de 15 minutos permite uma variação mais adequada entre a acessibilidade e seus determinantes. Já para o transporte motorizado coletivo, o tempo de 15 minutos permite que poucos empregos serem alcançados, enquanto o tempo de 30 minutos permite uma melhor avaliação. Além disso, o tempo de 30 minutos está mais próximo do tempo médio de viagem dos indivíduos em grandes cidades. Além das vantagens já citadas, esse indicador possibilita a divisão entre baixa e alta escolaridade, sendo utilizados como aproximação para representar a população de baixa e alta renda, respectivamente.

A acessibilidade foi calculada a partir de hexágonos de 0,11 km². Assim, para agregar os dados nas zonas de análise, utilizou-se como referência a quantidade de empregos correspondente ao terceiro quartil de empregos, na pretensão de considerar a maior quantidade de empregos que poderia ser acessada a partir das zonas, mas descartando-se possíveis outliers.

Figura 22 - Regiões e zonas de análise de Fortaleza.



Fonte: Elaborado pela autora.

Para representar os problemas do subsistema de uso do solo, foram mensurados os indicadores de densidade de empregos e distância às centralidades. As densidades foram obtidas através dos dados de empregos em cada zona, a partir de dados do IPEA (Pereira *et al.* 2022), divididos pela área da zona. Esse indicador também permite a divisão por escolaridade. Para as distâncias, 49 zonas foram consideradas centrais (Sousa, 2019). Foi então calculado o somatório das distâncias entre cada zona e os centros, ponderada pelos empregos nas zonas centrais. Para a representação do subsistema de transportes, foram utilizados indicadores da infraestrutura da rede viária e medidas da infraestrutura e desempenho da rede de transporte público.

As características da infraestrutura da malha viária foram consideradas a partir do cálculo da densidade de vias de grande capacidade (como arteriais e expressas) e da cobertura da malha viária, medidas a partir da densidade de quilômetros de vias por zona. Já para a oferta de transporte público, foi calculado o tempo de espera nas paradas e total de viagem, na hora-pico, a soma de frequência das linhas de alta capacidade e a densidade de paradas de ônibus por zona, representando a cobertura da rede.

Tabela 3 - Indicadores utilizados na aplicação

Variável	Indicador	Fonte
Acessibilidade	Quantidade de empregos que podem ser acessados dentro de 30 min.	IPEA
Densidade de empregos	Quantidade de empregos na zona disponíveis para uma certa classe de renda dividida pela área da zona	
Distância às centralidades	Distância euclidiana média ponderada pelas oportunidades de empregos das centralidades	
Oferta da infraestrutura de malha viária	Densidade de vias arteriais e expressas (vias de alta capacidade) Densidade de km de vias (cobertura)	Sousa (2019) SEUMA-For
Oferta do sistema de transporte coletivo	Soma da frequência das linhas de alta capacidade na hora-pico Densidade de paradas de ônibus por zona (cobertura) Tempo médio de espera nas paradas Tempo médio de viagem (total) para todas as demais zonas	ETUFOR CBTU
Quantidade de domicílios	Total de domicílios em uma zona, divididos por renda	PASFOR (2020)
Quantidade de viagens	Total de viagens por domicílio com origem na zona na hora-pico	
Comprimento de viagem	Média do comprimento da viagem por zona na hora-pico	

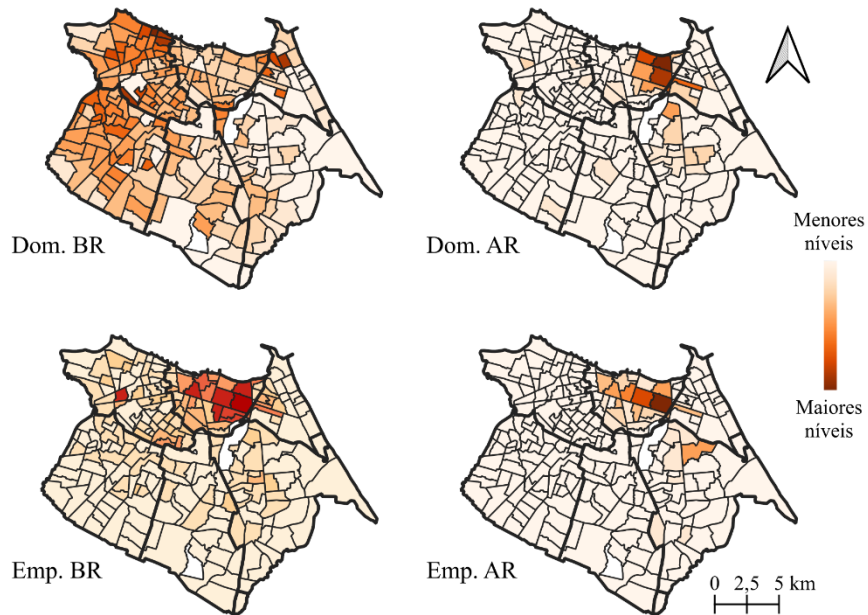
Fonte: Elaborado pela autora.

Para os indicadores de mobilidade, foram utilizados indicadores de produção de viagens na zona e a média da distância percorrida por zona, através dos dados de viagens da pesquisa OD realizada em Fortaleza em 2020 (PASFOR, 2020). A produção de viagens foi calculada a partir da soma de todas as viagens realizadas com origem na zona e por motivo trabalho, no horário de pico da manhã. Já para a distância, foi calculado o comprimento das viagens dos indivíduos, a partir do qual se mensurou a média para cada zona, também no horário de pico da manhã.

5.1.3 *Análise da distribuição das restrições no território*

A Figura 23 mostra a distribuição dos empregos e dos domicílios de acordo com cada classe social. Os dados foram divididos em dez intervalos iguais. Essa escolha foi feita para se melhor avaliar as desigualdades entre regiões, permitindo a observação das zonas com maiores ou menores intensidade do indicador. É possível confirmar a concentração dos empregos na região central para ambas as rendas. Em relação à distribuição dos domicílios, é possível perceber que, apesar do processo de autoss segregação, os domicílios de alta renda ainda se encontram predominantemente na região central, próximos aos empregos. Por outro lado, os domicílios de baixa renda estão mais concentrados nas regiões periféricas, tendo que enfrentar maiores distâncias até os empregos.

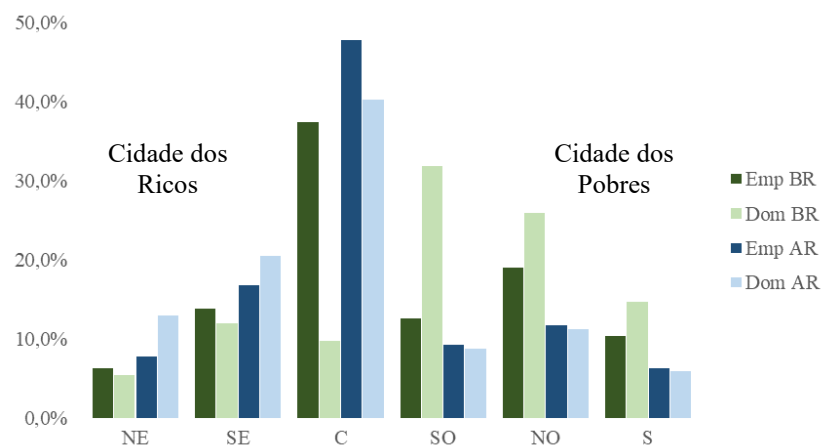
Figura 23 - Espacialização dos indicadores de uso do solo



Fonte: Elaborado pela autora.

Na região central estão concentrados 37,5% e 47,9% dos empregos voltados para as classes de baixa e alta renda (Figura 24), respectivamente. Nessa região também está a maior porcentagem de domicílios de alta renda (40,3%). Enquanto isso, a região sudoeste é a que mais concentra domicílios de baixa renda (31,9%), corroborando com a hipótese de *spatial mismatch* devido à má distribuição de empregos e domicílios sobre o território.

Figura 24 - Concentração de empregos e domicílios da alta e baixa renda por região de Fortaleza

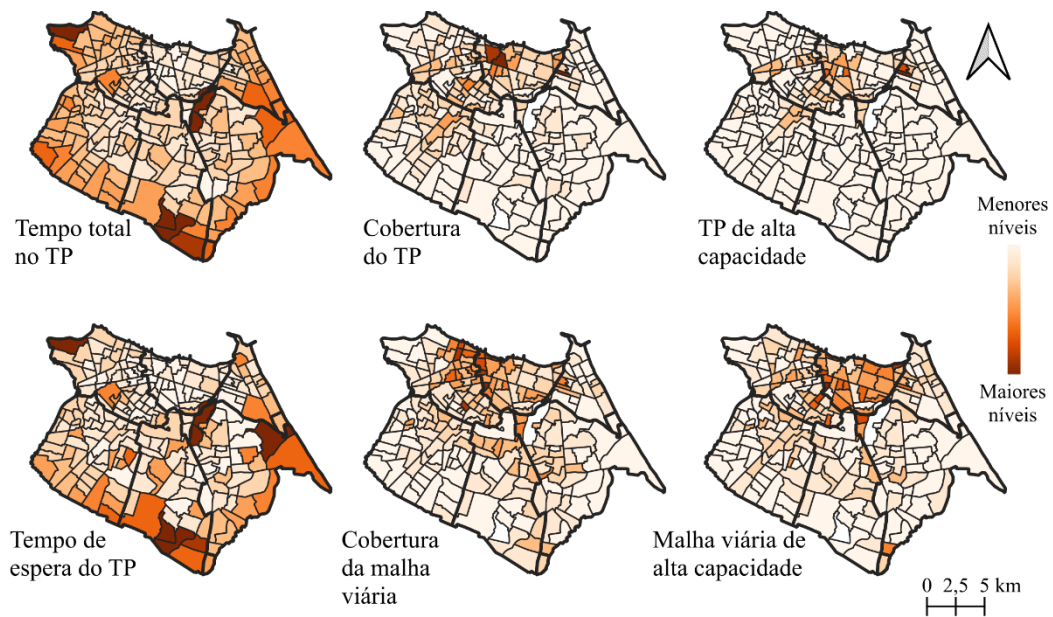


Fonte: Elaborado pela autora.

É possível observar através da Figura 25 a forma marcante como os tempos de

espera nas paradas e de total de viagem aumentam de acordo com o distanciamento do centro, mostrando que uma parcela dos domicílios de baixa renda, especialmente aqueles na região sudeste, estão em piores condições. Nota-se a maior predominância da cobertura do sistema de transporte coletivo e de sua infraestrutura de alta capacidade nas regiões Centro e Noroeste, em um vetor centro-periferia e tendência de aumento ao se aproximar do centro.

Figura 25 - Espacialização dos indicadores de transportes



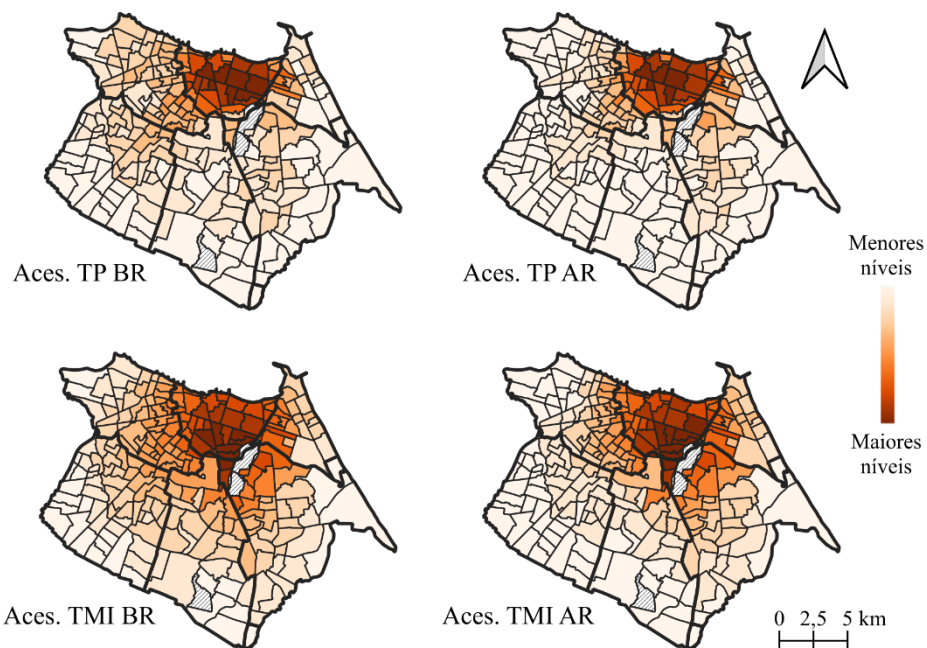
Fonte: Elaborado pela autora.

É possível perceber que a cobertura da malha viária é mais forte na região Central. Nota-se também uma maior incidência na direção sudeste. A malha viária de alta capacidade, que também possui maior concentração no centro, se distribui com maior intensidade em dois vetores centro-sul: um para o Sudoeste e outro para o Sudeste. Analisando essas distribuições, é esperado que a região Central possua os maiores valores para acessibilidade para todos os estratos sociais e modos de transportes, enquanto a região Sul e Sudoeste, possua as piores condições.

A Figura 26 apresenta a espacialização do indicador de acessibilidade, dividido entre transporte público (TP) e transporte motorizado individual (TMI), para a alta (AR) e a baixa renda (BR). É possível notar a diferença na distribuição espacial da acessibilidade. Claramente, a região central possui os melhores níveis, para todos os modos e classes. Além disso, também é possível distinguir uma diferença na distribuição dos níveis de acessibilidade entre modos. Para o transporte público, os níveis mais baixos de acessibilidade podem ser

encontrados em um maior número de zonas. Já a acessibilidade através do transporte motorizado individual, mesmo no tempo de 15 minutos (metade do tempo do coletivo), seus níveis são distribuídos sobre o território de forma menos desigual. Isso mostra que a quantidade de empregos que podem ser alcançados a partir de cada zona, em um mesmo tempo de viagem, é muito maior através do modo privado do que por transporte coletivo, ressaltando a desigualdade entre os modos. A zonas com os piores níveis de acessibilidade são aquelas no Sudoeste, justamente a região com maior nível de domicílios de baixa renda.

Figura 26 - Espacialização dos indicadores de acessibilidade



Fonte: Elaborado pela autora.

5.1.4 Caracterização das associações

Os testes de correlação não espacial mais conhecidos são o de Spearman e Pearson. O teste de Pearson tem como premissa a linearidade entre as variáveis, enquanto o teste de Spearman não possui essa premissa. Dificilmente as relações entre as variáveis são lineares, sendo então o teste de Spearman recomendado para medir a correlação entre as relações na mesma zona. Como as variáveis de infraestrutura são representadas através de latentes, não foi possível medir as correlações que as envolviam. A Tabela 4 mostra os resultados para as correlações entre os demais indicadores. É possível observar que, para todos os modelos, a relação da distância aos centros com a densidade de empregos e a acessibilidade é inversamente proporcional, como já era esperado. Os empregos possuem uma

correlação sobre a acessibilidade forte e positiva, também seguindo o esperado. Para essas relações, valor do coeficiente de Spearman é um pouco maior que o Moran bivariado, entendendo-se que as correlações entre as características das zonas são mais fortes que a correlações entre as características da vizinhança sobre as da zona.

Como era esperado, a correlação entre as distâncias às centralidades e os domicílios de baixa renda foi direta, ou seja, quanto maior as distâncias até os centros, maior a quantidade de domicílios em uma zona. A direção da relação entre as distâncias e os domicílios de alta renda também seguiu o esperado, havendo nesse caso aumento da quantidade de domicílios com a diminuição das distâncias até o centro. Por não se ter uma diferença significativa entre os resultados da correlação espacial e a não espacial, se supõe que a distribuição de domicílios é bastante homogênea entre a zona de análise e as zonas vizinhas.

A correlação entre a acessibilidade e a quantidade de viagens se mostrou fraca para a classe de baixa renda. Para a alta renda, a correlação entre a acessibilidade na zona e a quantidade de viagens foi positiva para o modo coletivo, enquanto que para o modo individual, a correlação entre a acessibilidade das zonas vizinhas e a quantidade de viagens na zona se mostrou como a única relevante.

A correlação entre a acessibilidade e a distância média de viagem é negativa para a baixa renda, seguindo o esperado. Já para a alta renda, esse resultado só ocorreu para o modo individual, através da correlação de Spearman. Para o modo coletivo, a melhoria na acessibilidade e a distância média percorridas possuem correlação positiva. Porém, essas correlações não se mostraram fortes.

Como foi suposto, a quantidade de domicílios em uma zona apresenta alta correlação com a quantidade de viagens produzidas nessa zona, em todos os modelos. A distância média de viagem apresenta relação também positiva com a quantidade de domicílios, mas é uma relação mais fraca.

Tabela 4 - Correlações entre as variáveis através do coeficiente de Spearman e Moran bivariado

Relações		Baixa renda				Alta renda			
Causa	Efeito	Coletivo		Individual		Coletivo		Individual	
		S	M	S	M	S	M	S	M
dist	emp	-0,65	-0,52	-0,65	-0,52	-0,61	-0,45	-0,65	-0,45
dist	aces	-0,82	-0,71	-0,95	-0,85	-0,85	-0,71	-0,95	-0,83
dist	dom	0,36	0,36	0,36	0,36	-0,30	-0,28	-0,30	-0,28
emp	aces	0,79	0,69	0,69	0,58	0,76	0,68	0,79	0,56
aces	viag	0,01	-0,03	-0,07	-0,08	0,29	0,09	0,01	0,36
aces	dist_med	-0,26	-0,25	-0,23	-0,22	0,24	0,12	-0,26	0,17
dom	viag	0,66	0,11	0,66	0,18	0,47	0,05	0,66	0,44
dom	dist_med	0,28	0,16	0,09	0,13	0,44	0,14	0,28	0,13

Fonte: Elaborado pela autora.

5.1.5 Formulação dos modelos

A especificação das equações estruturais é realizada a partir das relações identificadas no diagrama causal da Figura 21. Primeiramente, entende-se que os indicadores das características socioeconômicas e de modo de transportes são variáveis moderadoras por causar heterogeneidade nas estimativas. Dessa forma, os dados são segmentados por classe socioeconômica através da divisão entre baixa e alta escolaridade, sendo utilizados como aproximação para representar a baixa e alta renda, respectivamente. Os dados também foram separados entre os modos transporte motorizado coletivo e individual. Observando-se a Figura 21, pode-se notar que a única variável exógena identificada é a de distâncias às centralidades, sendo as demais variáveis endógenas.

Para a estimação das equações estruturais, cada seta no diagrama será representada por um parâmetro estimado. Para cada equação, existe um erro residual (ε), que por sua vez é representado pela média e variância, assim como a variável exógena. A seguir são apresentadas as equações estruturais para os dois modos, onde $D(0, \sigma)$ representa a distribuição da variável com média 0 e desvio padrão σ e β representa os parâmetros da regressão.

Modo motorizado coletivo

- $emp_dens = \beta_1.dist_cent + \varepsilon_1$
- $infraestrutura = \beta_2.dist_cent + \varepsilon_2$
- $operaçãoTP = \beta_3.dist_cent + \varepsilon_3$
- $acessibilidade = \beta_4.emp_dens + \beta_5.infraestrutura + \beta_6.operaçãoTP + \beta_7.dist_cent + \varepsilon_4$
- $domicílios = \beta_8.dist_cent + \varepsilon_5$
- $viagens = \beta_9.acessibilidade + \beta_{10}.domicílios$

Modo motorizado individual

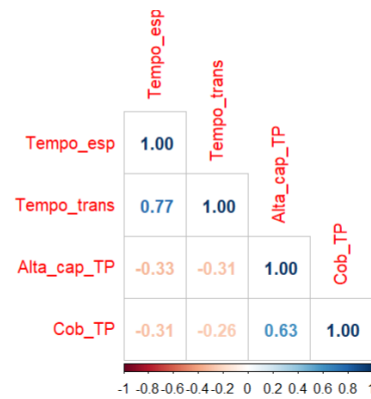
- $emp_dens = \beta_1.dist_cent + \varepsilon_1$
- $infraestrutura = \beta_2.dist_cent + \varepsilon_2$
- $acessibilidade = \beta_3.emp_dens + \beta_4.infraestrutura + \beta_5.dist_cent + \varepsilon_3$
- $domicílios = \beta_6.dist_cent + \varepsilon_4$
- $viagens = \beta_7.acessibilidade + \beta_8.domicílios + \varepsilon_5$
- $dist_med = \beta_9.acessibilidade +$

- $+ \varepsilon_6$
 - $dist_med = \beta_{11}.acessibilidade + \beta_{12}.domicilios + \varepsilon_7$
 - $dist_cent = D(0, \sigma^2_8)$
 - $\varepsilon_1 = D(0, \sigma^2_1)$
 - $\varepsilon_2 = D(0, \sigma^2_2)$
 - $\varepsilon_3 = D(0, \sigma^2_3)$
 - $\varepsilon_4 = D(0, \sigma^2_4)$
 - $\varepsilon_5 = D(0, \sigma^2_5)$
 - $\varepsilon_6 = D(0, \sigma^2_6)$
 - $\varepsilon_7 = D(0, \sigma^2_7)$
 - $cov(infraestrutura, emp_dens) = \sigma^2_9$
 - $cov(opera\c{c}aoTP, emp_dens) = \sigma^2_{10}$
 - $cov(infraestrutura, opera\c{c}aoTP) = \sigma^2_{11}$
- $dist_cent = D(0, \sigma^2_7) + \beta_{10}.domicilios + \varepsilon_6$
 - $\varepsilon_1 = D(0, \sigma^2_1)$
 - $\varepsilon_2 = D(0, \sigma^2_2)$
 - $\varepsilon_3 = D(0, \sigma^2_3)$
 - $\varepsilon_4 = D(0, \sigma^2_4)$
 - $\varepsilon_5 = D(0, \sigma^2_5)$
 - $\varepsilon_6 = D(0, \sigma^2_6)$
 - $cov(infraestrutura, emp_dens) = \sigma^2_8$

Foi considerada uma correlação entre os indicadores de empregos e infraestrutura, ja que, como foi discutido no Capítulo 2, existe uma relação complexa entre a quantidade de empregos em uma zona e sua infraestrutura de transportes. Para a representação da infraestrutura de transportes, tanto para a malha viaria quanto para o sistema de transporte coletivo, foram utilizadas latentes reflexivas. Entende-se que existe mais de uma forma de se medir a infraestrutura e que o conjunto dessas medioes diminuem os erros atrelados aos dados.

Para o motorizado individual, a infraestrutura foi representada a partir da cobertura da rede viaria e da densidade de vias de alta capacidade. Ja para o motorizado coletivo, foram escolhidas duas latentes. Uma delas representando a infraestrutura, formada pela soma da frequência das linhas de alta capacidade e pela densidade de paradas de nibus. A outra latente, *operaçãoTP*, representa a operação do sistema de transporte coletivo, sendo formada pelo tempo médio de espera nas paradas e de viagem no veículo. Essas variaveis foram estimadas através das latentes reflexivas, pelos motivos ja discutidos anteriormente. A divisão entre infraestrutura e operação foi realizada após, primeiramente, perceber as correlaoes que havia entre os dados, como mostrado pela Figura 27. Apesar de haver correlação entre os tempos de viagem e espera e os elementos de infraestrutura, eles são bem mais reduzidos do que as correlaoes entre si.

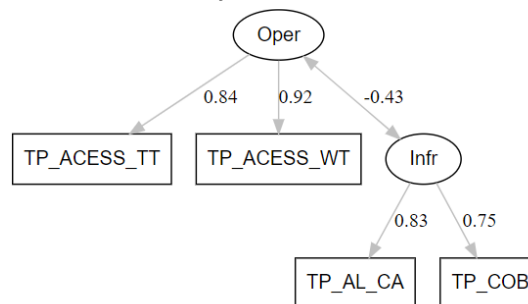
Figura 27 - Correlação entre os indicadores do transporte coletivo



Fonte: Elaborado pela autora.

A partir disso, foi estimado um modelo de medição com os indicadores do sistema de transporte coletivo. Os resultados, mostrados na Figura 28, apresentaram um ótimo ajuste através de suas medidas de ajuste (CFI = 1,00, TLI = 1,00, SRMR = 0,004). A covariância entre as latentes é negativa, indicando que quanto melhor os tempos de viagem, menor os tempos de espera, o que condiz com o esperado.

Figura 28 - Resultados da estimação do modelo de medição



Fonte: Autoria própria.

A seguir, são apresentadas as equações do modelo de medição, por modo, onde λ representa o parâmetro estimado.

Transporte motorizado individual:

$$\text{infraestrutura_alta_capacidade} = 1.\text{infraestrutura} + \varepsilon_{med\ 1}$$

$$\text{cobertura} = \lambda_1.\text{infraestrutura} + \varepsilon_{med\ 2}$$

Transporte motorizado coletivo:

$$\text{infraestrutura_alta_capacidade} = 1.\text{infraestrutura} + \varepsilon_{\text{med } 1}$$

$$\text{cobertura} = \lambda_1.\text{infraestrutura} + \varepsilon_{\text{med } 2}$$

$$\text{tempo_paradas} = 1.\text{operação} + \varepsilon_{\text{med } 3}$$

$$\text{tempo_viagem} = \lambda_2.\text{operação} + \varepsilon_{\text{med } 4}$$

Por possuírem diferentes latentes, os graus de liberdade dos modelos também serão calculados por modo. Para o motorizado coletivo, existem 6 variáveis manifestas e 4 indicadores para latentes (somando 10 variáveis observadas), 12 coeficientes estruturais, 1 variância da variável exógena, 3 covariâncias, 7 erros residuais, 2 coeficientes dos modelos de medição e 4 erros de medição (somando 29 parâmetros a serem estimados). Aplicando a Equação 7, chega-se ao total de 26 graus de liberdade para cada grupo de renda.

Para o modo motorizado individual, tem-se 6 variáveis manifestas e 2 indicadores para latentes (somando 8 variáveis observadas), 10 coeficientes estruturais, 1 variância da variável exógena, 1 covariância, 6 erros residuais, 1 coeficiente dos modelos de medição e 2 erros de medição (somando 21 parâmetros a serem estimados). Aplicando a Equação 7 chega-se a 15 graus de liberdade para cada grupo de renda.

Em modelos SEM multigrupo, para o cálculo dos parâmetros livres e graus de liberdade deve ser acrescentada informações sobre os interceptos (Siqueira, 2021). Para cada variável do modelo, deve ser acrescentado um intercepto. Assim, para o modelo de transporte coletivo, obtêm-se 36 (10 + 26) graus de liberdade, totalizando 68 graus, e para o modelo de transporte individual, obtêm-se 29 (8 + 21) graus de liberdade, totalizando 60 graus. Considerando que as duas estruturas geraram graus de liberdade maiores que 1, então ambas estão identificadas.

5.1.6 Requisitos dos testes e escolha do estimador

O requisito de homogeneidade no efeito dos dados foi contornado e justificado ao se segmentar a amostra entre dados de alta e baixa renda, e entre os modos motorizado coletivo e individual. Considera-se que a autocorrelação espacial entre as variáveis, que viola a premissa de independência entre os dados, foi controlada ao se incluir a causa dessa autocorrelação nos modelos. Nesse caso, a distância às centralidades gera a autocorrelação encontrada nos dados de uso solo e de transportes. O indicador de acessibilidade possui autocorrelação espacial devido a própria forma de cálculo: a acessibilidade depende das

características da própria zona, bem como das características das zonas ao redor. Assim, as características das zonas ao redor geram influência na acessibilidade da zona de origem, levando a uma relação causal, nesse caso considerada direta, entre a distância às centralidades e a acessibilidade.

A análise da normalidade para os modelos SEM com variáveis latentes é um pouco mais complexa, pois se necessita calcular um peso para as latentes, chamado de *score factor*. Para se relaxar o requisito de normalidade multivariada da amostra, é necessário se ter 10 vezes mais amostras que parâmetros para se estimar. Seria então necessária uma base com mais de 290 amostras para os modelos de transporte motorizado coletivo e mais de 210 para o de motorizado individual. A amostra conta com informações de 232 zonas, sendo insuficiente para o para o motorizado coletivo. De acordo com essas considerações, para se realizar as estimativas dos modelos, foi escolhido o estimador MLM, disponível através do pacote *lavaan*, no R. Essa escolha foi realizada para se superar a falta de normalidade que possa haver entre os dados e sua influência sobre as estimativas.

5.1.7 *Estimação e avaliação do modelo*

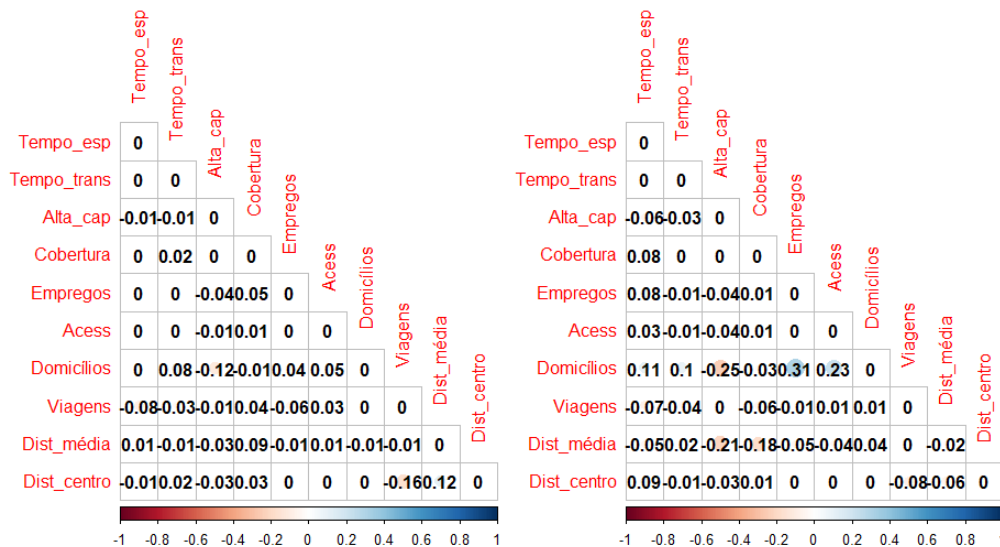
Após os modelos para os dois modos de transporte serem estimados, foram avaliados os indicadores de ajuste. A hipótese nula do teste de χ^2 foi rejeitada para ambos os modelos. Porém, as duas modelagens apresentaram outros indicadores que apontam para um bom ajuste com os dados, de acordo com os valores de corte para as medidas de ajustes apresentadas na Tabela 1. O SRMR teve valor de 0,04 para o motorizado coletivo e de 0,06 para o individual. O CFI foi o segundo indicador escolhido, sendo de 0,96 tanto para o coletivo, quanto para o individual. Para se entender melhor as inadequações que podem existir nos modelos, na Figura 29 estão as correlações residuais do modo motorizado coletivo, para a baixa renda (esquerda) e alta renda (direita), onde se pode observar que existem três e seis correlações residuais indicando mal ajuste na relação entre os pares de indicadores, respectivamente.

Para a baixa renda, a correlação residual na relação *Dist_cent-Viagens* e *Dist_cent-Dist_média* aponta que existe uma correlação entre os dois pares de variáveis não explicada pelo modelo. Levanta-se a hipótese de que, dado o mesmo nível de acessibilidade e quantidade de domicílios em uma zona, a distância até os centros exerce alguma influência sobre a produção e comprimento das viagens. Porém, de acordo com as análises conceituais realizadas por essa pesquisa, não se sabe quais seriam as explicações para essas relações.

Também parece haver uma correlação não explicada na relação *Domicílios-Alta_cap*. Porém, como essa relação se apresenta em um dos indicadores que forma a latente, eles podem ser superados pela associação com o outro indicador.

Já para a alta renda, existem relações não explicadas da quantidade de domicílios e os elementos da infraestrutura e operação de transporte, a densidade de empregos e a acessibilidade. Essas relações são bastante complexas e partem de um contexto em que se faz necessário compreender as decisões de escolha de onde residir realizada pelos indivíduos. Também há uma relação não explicada entre *Dist_média* e os indicadores da infraestrutura de transporte. Pode-se supor que os indivíduos de alta renda realizam viagens mais ou menos longas de acordo com os níveis de infraestrutura, o que não foi detectado para a classe de baixa renda. Percebe-se que as correlações residuais encontradas são diferentes entre as classes, sendo esperado que isso acontecesse, devido a heterogeneidade dos dados de acordo com a renda.

Figura 29 - Correlações residuais do modelo de transporte coletivo para baixa (esquerda) e alta (direita) renda



Fonte: Autoria própria.

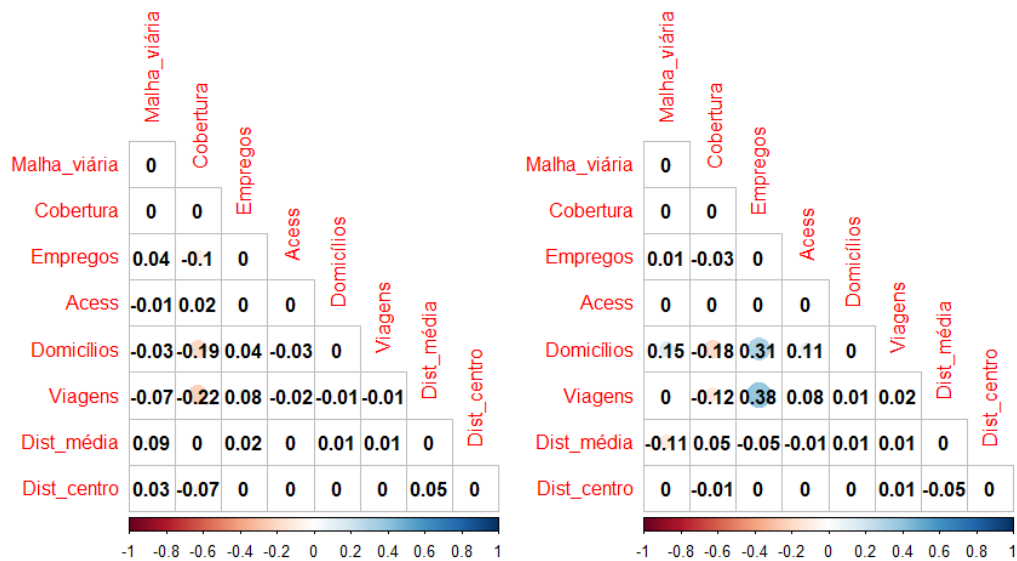
Na Figura 30 estão as correlações residuais para o modo motorizado individual, para a baixa (esquerda) e alta (direita) renda, onde existem três e sete más especificações, respectivamente. Para a baixa renda, todas as más especificações se referem a cobertura da malha viária, que é um dos indicadores da infraestrutura de transporte. De acordo com o diagrama causal, a infraestrutura não tem relação direta com a densidade de empregos, com os domicílios e nem com a produção de viagens. Nesse caso, esses problemas também podem ser

superados pela associação com o outro indicador da latente.

Para o grupo de alta renda, assim, como no caso anterior, existe relações não especificadas entre o indicador *Domicilios* e as características no uso do solo, transportes e o indicador de acessibilidade. O indicador de *Viagens* também apresentou má especificação em relação aos indicadores de *Cobertura* e *Empregos*, bem como houve má especificação na relação *Dist_média-Malha_viária*, indicado que há uma correlação entre esses indicadores para essa classe.

Esses problemas locais se distinguem entre os modos e as classes, não sendo explicadas pela análise conceitual. Apesar disso, ainda existem evidências para apoiar a estrutura causal elaborada, que são baseadas nas explicações teóricas, partindo-se então a apresentação dos resultados das estimativas.

Figura 30 - Correlações residuais para o modelo do transporte motorizado individual para baixa (esquerda) e alta (direita) renda



Fonte: Elaborado pela autora.

A Tabela 5 mostra os resultados das estimativas padronizadas obtidas para cada modelo, separados por estrados. É possível notar que existem diferenças na magnitude entre as classes dentro de um mesmo modo, além de diferenças entre os modos, corroborando com a hipótese de heterogeneidade entre os grupos. A discussão fenomenológica sobre os resultados dessas estimativas é realizada na seção 5.2, separadas em quatro partes, sendo elas: o efeito das distâncias às centralidades sobre as características dos subsistemas (5.2.1); os efeitos dos determinantes da acessibilidade aos empregos (5.2.2); os efeitos dos determinantes da produção de viagens (5.2.3); e os efeitos dos determinantes das distâncias médias de

viagens (5.2.4).

Tabela 5 - Resultados padronizados das estimativas da modelagem

Causa	Efeito	Motorizado coletivo		Motorizado individual	
		Baixa renda	Alta renda	Baixa renda	Alta renda
Dist_cent	Emp_dens	-0,58*	-0,65*	-0,58*	-0,65*
Dist_cent	Domicílios	0,45*	-0,57*	0,45*	-0,57*
Dist_cent	Infraestrutura	-0,61*	-0,49	-0,70*	-0,77*
Dist_cent	Operação	0,43*	0,66	-	-
Dist_cent	Acessibilidade	-0,35*	-0,50*	-0,72*	-0,73*
Emp_dens	Acessibilidade	0,50*	0,44*	0,10*	0,19
Infraestrutura	Acessibilidade	0,20*	0,05	0,19*	0,12
Operação	Acessibilidade	-0,07*	-0,07	-	-
Acessibilidade	Viagens	0,04	0,03	0,18*	0,13*
Domicílios	Viagens	0,49*	0,06	0,75*	0,81*
Acessibilidade	Dist_médias	-0,27*	0,20	-0,24*	0,09
Domicílios	Dist_médias	0,16*	-0,18	0,01	-0,06

* α = 5% de significância; ** α = 10% de significância.

Fonte: Elaborado pela autora.

5.2 Desigualdades socioespaciais na acessibilidade e seus efeitos sobre os padrões de mobilidade de Fortaleza

5.2.1 Efeitos das distâncias aos centros de empregos

A variável das distâncias aos centros de empregos foi utilizada para controlar os caminhos de *back-door*. Assim, os efeitos gerados por essa variável não devem ser interpretados como em efeitos causais, pois não foram controlados.

A relação entre as $Dist_cent \rightarrow Emp_dens$, assim como entre $Dist_cent \rightarrow Domicílios$, independe do modo de transporte, variando apenas de acordo com a classe socioeconômica. As estimativas são semelhantes entre as classes, apesar do valor para a baixa renda ser um pouco menor que para a alta renda, o que pode indicar uma maior distribuição espacial dos empregos para a baixa renda. A hipótese de *spatial mismatch* é corroborada com os resultados para a relação entre distâncias às centralidades e a quantidade de domicílios de baixa renda. Enquanto os empregos diminuem com as distâncias, a quantidade de domicílios para essa classe aumenta. Por outro lado, a quantidade de domicílios de alta renda diminui com as distâncias, apoiando a ideia de que essa classe está em localização privilegiada em relação aos empregos, evidenciando as desigualdades entre baixa e alta renda.

A relação $Dist_cent \rightarrow Infraestrutura$ para o modo individual produziu estimativas semelhantes para ambas as rendas, indicando que os níveis de oferta de malha

viária diminuem de com a distância para os empregos voltados para as duas classes socioeconômicas. Os valores com intensidade maior do que para o modo coletivo pode indicar uma melhor distribuição da oferta do transporte público do que da oferta de malha viária, em relação aos empregos de baixa renda. Para o modelo do transporte motorizado coletivo, a relação entre as distâncias até os centros e a infraestrutura e operação só foi significativa para o grupo de baixa renda. Nesse caso, a estimativa para a relação entre os indicadores $Dist_cent \rightarrow Infraestrutura$ aponta que a infraestrutura para transporte público diminui de acordo com a distância até os empregos para a baixa renda; da mesma forma, a estimativas para a relação $Dist_cent \rightarrow Operação$ indica que o tempo de espera e deslocamento para o transporte coletivo diminui com as distâncias, apesar de que com uma intensidade menor do que para a infraestrutura, possivelmente por esses tempos serem mais bem distribuídos pelo território. Esses resultados sustentam a ideia de que a população de baixa renda em situação mais precária, já que precisam enfrentar mais dificuldades no acesso ao transporte público.

5.2.2 *Determinantes da acessibilidade*

As estimativas para a relação $Dist_centr \rightarrow Acessibilidade$, nos dois modelos e para as duas classes socioeconômicas, fornecem indícios de que os níveis de acessibilidade diminuem com a distância até os centros de empregos. Para analisar os resultados, é importante lembrar que essa relação busca capturar o efeito das características dos subsistemas das zonas vizinhas sobre a acessibilidade. As estimativas são menores para o modo coletivo do que para o individual, para as duas classes de renda. Esse resultado pode ser consequência da maior relevância que os empregos dentro da zona tem para a acessibilidade por transporte coletivo do que os empregos fora da zona. Isto é, quando há um maior número de empregos dentro da zona, a acessibilidade se torna melhor do que quando há mais empregos em seus arredores. Essa explicação é apoiada pelo resultado da relação $Emp_dens \rightarrow Acessibilidade$, que possui estimativa maior do que a relação $Dist_centr \rightarrow Acessibilidade$. Para o modo individual, como os veículos conseguem percorrer uma maior distância em menor tempo, a quantidade de oportunidades fora da zona se torna mais relevante que aquelas dentro da zona, o que também é apoiado pela baixa intensidade na relação $Emp_dens \rightarrow Acessibilidade$.

Para o modelo do modo coletivo, o efeito da relação $Emp_dens \rightarrow Acessibilidade$ é positivo para as duas classes de renda, corroborando para a hipótese de que a proximidade

aos empregos aumenta a acessibilidade a esse tipo atividade. Já a infraestrutura e operação apresentaram efeitos de menor intensidade sobre a acessibilidade, não sendo significativos para a classe de alta renda. Esses resultados podem indicar que, para a melhoria da acessibilidade da população de baixa renda, classe que mais depende esse modo, a melhor distribuição dos empregos terá maior impacto na acessibilidade do que a melhoria da infraestrutura. Esses resultados vão na contramão do que vem sendo praticado pelas políticas da cidade que, como explicado na análise conceitual sobre o fenômeno, investem na oferta de infraestrutura e serviços de transportes para melhorar a acessibilidade.

Já para o motorizado individual, o efeito da densidade de empregos e infraestrutura da malha viária, que só foram significativos para a classe de baixa renda, são positivas e bem semelhantes, sendo maior a intensidade para a infraestrutura. Esse resultado pode ter ocorrido devido a velocidade de viagem do transporte motorizado individual, que consegue alcançar muitas atividades em pouco tempo, dependendo assim mais das condições de infraestrutura.

A diferença apresentada entre os modos de transporte pode ser sentida pela população, que passa a valorizar mais a utilização do transporte motorizado individual devido a melhor condição de acesso fornecido pela infraestrutura para esse tipo de modo, sendo traduzido nos padrões de mobilidade, como discutido a seguir.

5.2.3 Determinantes da produção de viagens

Nos dois modelos, a quantidade de domicílios apresentou mais intensidade sobre o indicador de produção de viagens do que o indicador de acessibilidade.

Para o modo coletivo, a acessibilidade não se mostrou significativa para nenhuma das duas classes. Para a baixa renda, isso pode ter ocorrido por a acessibilidade não fazer diferença na escolha já que uma grande parcela dessa classe ser cativa do transporte coletivo. Essa hipótese é sustentada pela estimativa da relação *Domicílios* → *Viagens*, que é positiva, implicando que quanto mais domicílios de baixa renda existe em uma região, maior o número de viagens por transporte coletivo. Ou seja, as pessoas não optam mais pelo transporte público quando a acessibilidade oferecida por esse modo é melhor e menos quando é pior, sendo a escolha feita possivelmente por falta de opção. Por outro lado, para o estrado de alta renda, a falta de significância no resultado da relação *Acessibilidade* → *Viagens*, associado a falta de significância apresentada pela estimativa da relação *Domicílios* → *Viagens*, corroboram com a hipótese de que a alta renda prefere quase exclusivamente o transporte motorizado individual,

independentemente da acessibilidade, os a quantidade de domicílios da alta renda não parece afetar o número de viagens por esse modo.

Para o modelo de transporte individual, o indicador de acessibilidade apresentou efeitos significativos, mesmo que baixos para as duas rendas. Ou seja, a melhoria nas condições de acessibilidade gera mais viagens por esse modo. Apesar disso, os efeitos da quantidade de domicílios são bem maiores, levando a se acreditar que a maioria da população que pode optar por esse modo, mesmo na classe de baixa renda, vai escolhê-lo.

O fato de que as estimativas para a relação *Domicílios* → *Viagens* para a população de baixa renda são maiores para o modo individual do que para o coletivo produz evidências para se acreditar que os indivíduos que podem optar pelo modo individual produzem mais viagens que aqueles cativos do modo coletivo, o que pode levar a uma situação de maior exclusão social da população de baixa renda.

Se as condições atuais não mudarem, as gerações futuras poderão sofrer cada vez mais com o problema de exclusão. Por outro lado, considerando que em um cenário futuro as condições socioeconômicas da população melhorem, o que pode ser visto como um cenário ideal, a perspectiva é de que a demanda por transporte público diminua enquanto sobe a demanda por transporte individual, já que a população terá cada vez mais acesso aos veículos privados. Dessa forma, as políticas devem agir para tornar o serviço pelo modo coletivo mais atrativo, de outra forma as cidades só vão ter cada vez mais problemas devido aos padrões de mobilidade insustentáveis.

5.2.4 Determinantes das distâncias médias percorridas

Por fim, os determinantes das distâncias médias de viagem só se mostraram relevantes para a baixa renda, nos dois modelos de equações. Em ambos os modos, obtiveram-se estimativas com valores semelhantes, produzindo evidências de que quanto melhor a acessibilidade, menor o comprimento médio das viagens realizadas a partir de uma zona. Esse resultado mostra a importância da acessibilidade para se construir uma mobilidade mais sustentável. Pessoas de baixa renda cativas do transporte público, que é um modo mais lento, podem usufruir de viagens mais curtas quando a acessibilidade é melhor. Além disso, a redução no comprimento de viagens pelo modo individual trás diversos benefícios, já que esse modo é responsável por aumentar os níveis de problemas como poluição, acidentes e congestionamentos nos centros urbanos.

A competição pelas atividades, representada através da quantidade de domicílios

na zona, só apresenta resultados significativos para a baixa renda viajando por modo coletivo. Como foi hipotetizado, quanto maior o número de pessoas na zona, maior são as distâncias viajadas. Isso indica que aqueles que são cativos do transporte público estão em piores condições, pois não podem escolher os locais mais próximos aos empregos, tendo que realizar viagens mais longas. Esse é mais um problema que pode levar a um indivíduo não realizar uma viagem, conduzindo a uma situação de exclusão social.

5.3 Crítica à modelagem das relações causais das desigualdades na acessibilidade e mobilidade

Para ilustrar como os modelos formulados por Garcia *et al.* (2018) e Sousa (2019) poderiam ter gerado vieses e má interpretação nos resultados ao se utilizar apenas a inferência estatística, sem o devido controle das fontes de endogeneidade e sem identificar os caminhos diretos e indiretos, foram utilizados os dados de Fortaleza para a realização de três modelagens, explicadas a seguir. Nesta seção não se pretende fazer uma análise fenomenológica sobre a cidade, mas apenas exemplificar com dados reais qual seria a forma de modelar as equações para impedir vieses e interpretar as estimativas de maneira adequada.

A Modelagem 1 buscou mostrar qual o viés causado por variáveis moderadoras. Através do diagrama causal da Figura 21, pode-se notar que as *características socioeconômicas* se constituem como variável moderadora, afetando a acessibilidade, a mobilidade e indicadores das características do uso do solo, levando heterogeneidade para os dados da população no geral. Foram então comparadas as estimativas de uma regressão com e sem segmentação da amostra por classe de renda (alta e baixa), onde o objetivo é estimar o efeito da *acessibilidade* e da *quantidade de domicílios* sobre a *produção de viagens* por transporte motorizado individual.

A Modelagem 2 buscou evidenciar a ocorrência de vieses gerados pela endogeneidade. Para isso, utilizou-se como relação de interesse o efeito da *densidade de empregos* em uma zona sobre a *acessibilidade*. De acordo com o diagrama causal, as *distâncias as centralidades* exerce endogeneidade sobre essa relação. Foram então estimados coeficientes de regressão para o indicador da *densidade de empregos*, para o modo motorizado individual da classe de baixa renda, comparando-se as estimativas com e sem a variável de controle.

A Modelagem 3 representa como pode ocorrer má interpretação das relações causais de interesse. Para isso, será utilizada a relação entre a *distância média de viagem* por

transporte motorizado individual e suas causas, que são hipotetizadas como a *acessibilidade* e a *quantidade de domicílios*. Os efeitos estimados são totais para a variável *Domicílio*, mas apenas direto para o indicador de *Acessibilidade*. Para se encontrar o efeito total do indicador de *acessibilidade*, regrediu-se uma equação com essa variável e a variável de infraestrutura, pois essa última causa endogeneidade à relação. Na verdade, o efeito estimado é apenas o efeito direto da acessibilidade, mais o efeito indireto que passa pelos domicílios.

A Tabela 6 apresenta estimativas dos efeitos das restrições sobre a acessibilidade para dados sem segmentação da população (Geral) e para os grupos de baixa (BR) e alta (AR) renda, resultado da Modelagem 1. Pode-se notar que existem diferenças nas estimativas entre grupos que são ignoradas ao se analisar os dados sem considerar a heterogeneidade na população, especialmente para os indicadores de uso do solo. Ao se segmentar a população, é possível entender quais as restrições mais relevantes para cada grupo, permitindo um melhor entendimento sobre a problemática.

Tabela 6 - Efeitos diretos sobre a produção das viagens, com e sem divisão por grupo socioeconômico

Indicador	Geral	BR	AR
Acessibilidade	0,95*	1,70*	0,15**
Domicílios	0,79*	0,83*	1,31*

* $\alpha = 5\%$ de significância; ** $\alpha = 10\%$ de significância

Fonte: Elaborado pela autora.

A Tabela 7 apresenta os resultados para a Modelagem 2, que aponta como a endogeneidade pode afetar as estimativas em uma relação de interesse. Ao se regredir uma equação com a *densidade de empregos* como a única variável explicativa, a estimativa é enviesada, pois existe uma fonte de endogeneidade agindo sobre a relação. Pode-se notar que seu valor cai 70,8 % ao se incluir as *distâncias às centralidades* como variável de controle. Isso ocorre devido ao bloqueio dos efeitos indiretos que essa variável causa na *produção de viagens*. Ao se incluir a *cobertura da malha viária*, outra variável significativa na explicação da acessibilidade por transporte motorizado individual, a estimativa para a *densidade dos empregos* não se altera, pois não existe relações entre elas.

Tabela 7 - Estimativas do efeito da densidade de empregos sobre a acessibilidade com e sem a variável de controle

Variáveis de controle	Densidade de empregos	R ²
Nenhuma	0,24*	37,7 %
Distâncias às centralidades	0,07*	82,5 %
Distâncias às centralidades, cobertura da malha viária	0,07*	83,2 %

* $\alpha = 5\%$ de significância; ** $\alpha = 10\%$ de significância

Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados da Modelagem 3 estão na Tabela 8, que apresenta os efeitos diretos e totais dos determinantes das viagens. Ao contar com os efeitos indiretos, a intensidade do indicador de *acessibilidade* sobre a variável explicada dobra o seu valor. Assim, pode-se notar que apresentar apenas o efeito direto subestima o real efeito das variáveis explicativas sobre a explicada.

Tabela 8 - Estimativa dos efeitos totais e diretos sobre a distância média de viagens

Indicador	Diretos	Totais
Acessibilidade	1,14**	2,28*
Domicílios	1,09*	1,09*

* $\alpha = 5\%$ de significância; ** $\alpha = 10\%$ de significância

Fonte: Elaborado pela autora.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A compreensão das causas das desigualdades socioespaciais na acessibilidade é central no atual paradigma do planejamento urbano integrado, devendo o princípio da sustentabilidade guiar as discussões. Essas desigualdades se manifestam com grande intensidade nas grandes cidades do Sul Global, sendo por isso a esfera social especialmente relevante nesses casos. Os padrões de mobilidade, que são afetados pela acessibilidade, são então influenciados por essas desigualdades, gerando padrões excludentes, sendo os indivíduos mais vulneráveis os mais prejudicados.

Surgiram pesquisas que buscam diagnosticar as causas dos problemas das desigualdades na acessibilidade urbana e seus efeitos sobre os padrões de mobilidade. Porém, em nível estratégico, a modelagem estatística utilizada nos trabalhos não levam em consideração as fontes de endogeneidade. Dessa forma, esta pesquisa teve como objetivo geral desenvolver um método baseado na teoria da inferência causal para investigar os determinantes das desigualdades socioespaciais na acessibilidade e seus efeitos sobre os padrões de mobilidade, no nível estratégico do planejamento urbano integrado.

Este capítulo foi dividido em três seções. Na seção 6.1 são destacadas as contribuições metodológicas obtidas após se alcançar os objetivos específicos propostos; na seção 6.2 são apresentadas as contribuições fenomenológicas obtidas sobre a problemática das desigualdades socioespaciais na acessibilidade e seus efeitos sobre os padrões de mobilidade ao trabalho na cidade de Fortaleza; na seção 6.3 são feitas recomendações para futuras pesquisas.

6.1 Contribuições metodológicas

Uma base conceitual foi desenvolvida, sendo entendido através da literatura que os principais determinantes da problemática de desigualdades na acessibilidade e mobilidade vem das inadequações do uso do solo e da ineficiência nos sistemas de transportes, bem como das características dos indivíduos. Também foi compreendido que cada um desses subsistemas possui desequilíbrios, o que levou a uma representação dos determinantes dos problemas de desigualdades socioespaciais na acessibilidade e seus efeitos sobre os padrões de mobilidade para as grandes cidades brasileiras. Assim, o primeiro objetivo desta dissertação, que foi representar conceitualmente como os subsistemas urbanos de transportes, uso do solo e atividades formam as restrições que geram às desigualdades socioespaciais na acessibilidade e

seus decorrentes padrões de mobilidade urbana, pode ser alcançado.

Entre as contribuições dessa representação está a possibilidade de se perceber que a má distribuição dos empregos e domicílios sobre o território é a principal inadequação do subsistema de uso do solo que leva às desigualdades socioespaciais na acessibilidade. A concentração dos empregos em locais de alto valor do solo causam problemas de *spatial mismatch* para a baixa renda, enquanto a alta renda, apesar de também ter sofrido descentralização, ainda reside em locais privilegiados. A partir dessa ótica, é possível direcionar os estudos e análises sobre o território, conduzindo pesquisas que busquem encontrar onde se concentram a população de baixa e alta renda e quais as distâncias que cada classe precisa enfrentar para se chegar aos empregos. Dessa forma, será possível guiar as análises que levem em consideração as necessidades da classe mais vulnerável. Através da representação também é possível verificar a diferença nos investimentos entre os modos de transporte motorizado coletivo e individual são responsáveis pelas desigualdades na acessibilidade. Ao se compreender que a priorização da malha viária traz mais benefícios para a população já privilegiada, pois diminui os tempos por transporte individual, não levando tantos benefícios para a população mais vulnerável dependente de transporte coletivo, é possível conduzir as discussões na direção de uma distribuição mais justa dos investimentos públicos. Assim, a partir da representação, sugere-se que as análises verifiquem como se dá a distribuição das características do subsistema de transporte sobre o território, tanto o motorizado individual quanto o coletivo, verificando as desigualdades no alcance dessas infraestruturas pela população de baixa e alta renda. A representação também possibilita perceber que os padrões de mobilidade produzidos a partir desse cenário de desigualdades são excludentes e insustentáveis. A população mais vulnerável é a mais prejudicada, tendo que enfrentar viagens mais longas ou não podendo realizar as viagens desejadas, o que pode levar a um quadro de exclusão social. O aumento na oferta de transporte motorizado individual incentiva o uso por esse modo, o que além de aumentar os problemas trazidos por esse modo, também beneficia mais a população mais privilegiada. Dessa forma, os estudos conduzidos para se entender os padrões de mobilidade devem verificar as diferenças entre as escolhas realizadas pela baixa e alta renda, bem como o comprimento de viagens. Entender esses comportamentos e seus determinantes possibilita se entender os impactos das intervenções ao longo do tempo.

As modelagens realizadas para complementar a crítica sobre a modelagem realizada sem o devido controle da endogeneidade e sem o apoio de um diagrama causal, especificando as relações diretas e indiretas, mostraram alguns problemas que poderiam ter

ocorrido ao se analisar o fenômeno das desigualdades socioespaciais na acessibilidade para a cidade de Fortaleza. A segmentação dos dados entre classes socioeconômicas se mostrou essencial, já que existem diferenças importante entre os grupos socioeconômicos, que apontam para as desigualdades entre os grupos. Vale destacar que a modelagem realizada por Garcia *et al.* (2018) foi aplicada para a cidade de Lisboa, que apresenta um contexto socioeconômico diferente do contexto brasileiro. Dessa forma, a segmentação nesse caso pode não ter sido relevante, ressaltando a importância em se basear as hipóteses causais em uma análise conceitual sobre o fenômeno analisado antes de se aplicar uma modelagem.

A proposta metodológica para análise as relações causais das desigualdades na acessibilidade e mobilidade desenvolvida nesta dissertação foca no desenvolvimento de uma base conceitual bem elaborada para apoiar as hipóteses causais. Esse contexto é importante para a análise ao direcionar os esforços de maneira condizente com a realidade. A proposta pretende que a atenção seja voltada para a interpretação dos resultados de acordo com hipóteses que fazem sentido com o cenário observado, não sendo apenas conduzida por estimativas estatísticas. O estabelecimento das possíveis fontes de viés é de fundamental importância para o estabelecimento da causalidade, já que variáveis que levam endogeneidade para as relações de interesse afetam essas estimativas.

6.2 Contribuições fenomenológicas

A proposta metodológica de análise da causalidade entre os determinantes das desigualdades na acessibilidade e na mobilidade urbana apresentada foi aplicada com dados da cidade de Fortaleza, atingindo assim o último objetivo específico desta dissertação.

A concentração dos empregos na região central valoriza essa área e atrai novos investimentos para ela e suas proximidades. Assim, além das oportunidades de empregos, a melhor infraestrutura fica concentrada nessa parte da cidade, caracterizando a desigualdade espacial na distribuição das características dos subsistemas de uso do solo e de transportes. Os locais de moradia da alta renda também se concentram nessa região, privilegiada pela acessibilidade. Houve uma dispersão dessa parcela da população no vetor Sudeste, que apesar de ocupar uma área mais distante do centro, ainda está localizada em uma região com boa infraestrutura de transportes e com a presença de atividades. Já as residências da população de baixa renda estão concentradas nas periferias da região Oeste, parcela de território que carece tanto de melhor infraestrutura de transportes quanto de oportunidades de empregos. Apesar de haver uma melhor distribuição do transporte público na região Noroeste, essa infraestrutura

não se mostrou muito relevante para a melhoria da acessibilidade da população de baixa renda. Essas conclusões foram semelhantes às encontradas no trabalho de Sousa (2019). A proximidade com os empregos, especialmente a densidade de empregos dentro da zona onde se localizam as residências, contribuem mais para a acessibilidade dessa classe.

Por outro lado, uma grande parte dos empregos na cidade podem ser alcançados em pouco tempo por transporte motorizado individual, o que faz as condições da malha viária possuírem uma alta relevância para aqueles que utilizam esse modo. Essa situação contribui para o espraiamento da população na cidade, bem como com a dependência cada vez maior pelo transporte motorizado individual. Dessa forma, a desigualdade entre classes fica ainda mais evidente, pois a população de alta renda, além de residir mais próxima aos empregos, também é a que mais utiliza o transporte individual, sendo a mais beneficiada pelas melhorias no subsistema de transportes.

As influências dessa desigualdade na acessibilidade entre os modos motorizados coletivo e individual pode ser sentida nos padrões de mobilidade urbana. A população de baixa renda, maior usuária do modo coletivo, não apresenta maior demanda por esse modo de transporte mesmo com a melhora na acessibilidade. Isso é interpretado como insatisfação da população com esse modo. Assim como a população de alta renda, que pouco opta pelo modo coletivo, é possível presumir que a população de baixa renda de Fortaleza realiza viagens por esse modo por não poder arcar com os custos do transporte motorizado individual. Mais ainda, a produção de viagens por domicílio é mais baixa para a baixa renda que para a alta renda. Esses resultados mostram as desigualdades existentes nos deslocamentos para o trabalho entre a população de baixa e alta renda, destacando a desvantagem vivida pela população de baixa renda da capital cearense.

Os resultados ainda apontam que, através da melhoria na acessibilidade, tanto por transporte motorizado coletivo quanto pelo individual, é possível diminuir as distâncias viajadas pela população da baixa renda. Essa é uma melhoria importante tanto do ponto de vista social, quanto do ambiental. Diminuir as distâncias por transporte público facilita o engajamento da população cativo desse modo, reduzindo o risco de exclusão social. Viagens mais curtas por transporte motorizado individual traz benefícios para a cidade como um todo, já que reduz os problemas como poluição, acidentes e congestionamentos.

O investimento em infraestrutura e serviços de transporte coletivo não possui tanto efeito na acessibilidade por esse modo; já o investimento em malha viária incentiva as viagens por transporte motorizado individual. Assim, pode-se chegar ao entendimento de que políticas que busquem uma melhor distribuição nas características do uso do solo podem

beneficiar mais a população mais vulnerável de Fortaleza, diminuindo as desigualdades socioespaciais na cidade e incentivando viagens mais curtas por transporte motorizado.

6.3 Recomendações

São realizadas as seguintes recomendações para futuras pesquisas científicas:

a) A proposta metodológica aqui apresentada, apesar de buscar ser uma representação para as grandes cidades brasileiras, pode ser o ponto de partida para uma proposta que se estende a todas as grandes cidades latino-americanas. Uma análise conceitual sobre o fenômeno de desigualdades socioespaciais na acessibilidade grandes cidades latinas de outros países, verificando suas semelhanças, deve embasar essa nova proposta.

b) Apesar das modelagens realizadas terem produzido resultados significantes para a compreensão da problemática das desigualdades na acessibilidade para a cidade de Fortaleza, foram verificadas relações mal especificadas nos modelos. Esses problemas são diferentes entre os grupos de renda, para os modelos dos dois modos de transportes, como era esperado devido a heterogeneidade dos dados de acordo com a renda. Dessa forma, é sugerido que a remodelagem dessas relações, separando-se os modelos de acordo com a classe socioeconômica dos indivíduos e se buscando na teoria possíveis explicações para as relações problemáticas.

c) Para mensurar as desigualdades no tempo, se faz necessária a simulação dos dados através de modelos LUTI integrados. As consequências dessa modelagem na estimação dos modelos SEM ainda precisam ser analisadas. Dessa forma, se recomenda que sejam realizados estudos nessa área, conduzindo a uma proposta que englobe essa questão e possa melhor explicar a evolução das desigualdades socioespaciais na acessibilidade e suas consequências nos padrões de mobilidade entre gerações.

d) Cavalcante et al. (2022) defendem que para se alcançar a mobilidade sustentável, o foco da análise dos problemas deveria ser, além das desigualdades socioespaciais na acessibilidade, os padrões de mobilidade e suas externalidades. Identificar o que é um problema de mobilidade não é uma tarefa simples, pois eles se tornam um problema devido às suas externalidades. Por exemplo, uma das queixas mais comuns em grandes cidades é sobre a lentidão no tráfego, muitas vezes sobrecarregado por congestionamentos, o que leva a intervenções para melhorias na oferta de malha viária, aumentando o número de viagens e velocidade por esse modo. Porém, do ponto de vista da sustentabilidade ambiental, viagens mais lentas, mas realizadas através de transporte ativo, seriam preferíveis a viagens

realizadas pelo modo motorizado, já que geram menos poluição. Dessa forma, não basta apenas observar os padrões da mobilidade urbana para se dizer o que é ou não um problema de mobilidade. É necessário observar suas externalidades através da perspectiva dos princípios adotados no planejamento. Devido as desigualdades socioeconômicas, a esfera social se torna especialmente relevante nos países do Sul Global, pois a falta de mobilidade pode levar à exclusão social de uma parcela da população. Dessa forma, recomenda-se incluir na modelagem indicadores que representem as externalidades dos padrões de mobilidade, possibilitando a compreensão de como esses padrões afetam na qualidade do meio urbano.

REFERÊNCIAS

- ANSELIN, L.; SYABRI, I.; SMIRNOV, O. Visualizing Multivariate Spatial Correlation with Dynamically Linked Windows. **New Tools for Spatial Data Analysis: Proceedings of the Specialist Meeting**, 2002.
- ASSIS, R. F.; LOUREIRO, C. F. G.; SOUSA, F. F. L. M. Modelagem LUTI das decisões locais de diferentes grupos socioeconômicos: determinantes e inter-relações. **Urbe. Revista Brasileira De Gestão Urbana**, 14, 2022.
- BANISTER, D. The sustainable mobility paradigm. **Transport Policy**, 15, 2008. p. 73-80.
- BERTOLINI, L.; LE CLERCQ, F.; KAPOEN, L. Sustainable accessibility: a conceptual framework to integrate transport and land use plan-making. Two test-applications in the Netherlands and a reflection on the way forward. **Transport Policy**, 12, 2005. p. 207–220.
- BERTOLINI, L.; LE CLERCQ, F.; STRAATEMEIER, T. Urban transportation planning in transition. **Transport Policy**, 15, 2008. p. 69–72.
- BOARNET, M. G.; CHALERMPOONG, S. New Highways, House Prices, and Urban Development: A Case Study of Toll Roads in Orange County, CA. **Housing Policy Debate**, 12, 2001. p. 575-605.
- BOISJOLY, G. *et al.* Accessibility measurements in São Paulo, Rio de Janeiro, Curitiba and Recife, Brazil. **Journal of Transport Geography**, 82, 2020.
- BOLLEN, K. A. **Structural equations with latent variables**. 1º. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1989.
- BRATHWAITE, T.; WALKER, J. L. Causal inference in travel demand modeling (and the lack thereof). **Journal of Choice Modelling**, 26, 2018. p. 1-18.
- BRÖCKER, J.; KORZHENEVYCH, A.; SCHÜRMAN, C. Assessing spatial equity and efficiency impacts of transport infrastructure projects. **Transportation Research Part B**, 2010. p. 795–811.
- BRUNDTLAND, G. H. **Nosso futuro comum**. 2º. ed. Rio de Janeiro: Comissão mundial sobre meio ambiente e desenvolvimento, 1991.
- CARVALHO, C. H. R. D.; PEREIRA, R. H. M. **Efeitos da variação da tarifa e da renda da população sobre a demanda de transporte público coletivo urbano no Brasil**. Brasília: Ipea, 2011. (Texto para Discussão, n. 1595).
- CAVALCANTE, C. B. *et al.* Análise dos planos diretores de Fortaleza sob o paradigma do planejamento da acessibilidade e mobilidade da Urbe Sustentável. **urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana**, 12, 2020.
- CAVALCANTE, C. B. *et al.* Análise dos planos diretores e de mobilidade de Fortaleza: Há evidências de evolução para um paradigma de planejamento urbano integrado do uso do solo e transportes? **Anais do 36º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes**, 1, 2022. p. 1-

13.

CAVALCANTE, C. B. **Crítica ao planejamento urbano e de transportes em Fortaleza à luz do paradigma do planejamento da acessibilidade e mobilidade na urbe sustentável.** Universidade Federal do Ceará. Fortaleza. 2023.

COSTA, H. S. M. DESENVOLVIMENTO urbano sustentável: uma contradição de termos? **REVISTA BRASILEIRA DE ESTUDOS URBANOS E REGIONAIS**, 2, 2000. p. 55.

DAWID, A. P. Beware of the DAG! **JMLR: Workshop and Conference Proceedings**, 6, 2008. p. 59 – 86.

DEMIRELA, H. *et al.* Exploring impacts of road transportation on environment: a spatial approach. **Desalination**, 226, 2008. p. 279–288.

DEVORE, J. L. **Probabilidade e Estatística:** para Engenharia e Ciências. 6°. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2006.

DOWNS, A. The Law of Peak- Hour Expressway Congestion. **Traffic Quarterly**, XVI, 1962. p. 393-409.

DUQUE, J. C. *et al.* Spatiotemporal dynamics of urban growth in Latin American cities: An analysis using nighttime light imagery. **Landscape and Urban Planning**, 191, 2019.

EWING, R. H. Characteristics, Causes, and Effects of Sprawl: A Literature Review. In: MARZLUFF, J. M. E. A. **Urban Ecology**. Boston: Springer, 2008. p. 519-535.

EWING, R.; CERVERO, R. Travel and the Built Environment. **Journal of the American Planning Association**, 76, n. 3, 2010. p. 265-294.

FAN, X.; SIVO, S. A. Sensitivity of Fit Indices to Model Misspecification and Model Types. **Multivariate Behavioral Research**, 42, 2007. p. 509–529.

FOTHERINGHAM, A. S.; BRUNSDON, C.; CHARLTON, M. **Geographically Weighted Regression:** the analysis of spatially varying relationships. 1°. ed. West Sussex: John Wiley & Sons, 2002.

FREY; K.; DUARTE, F. Auto-segregação e a gestão das cidades. **Ciências Sociais em Perspectiva**, 5, n. 9, 2006.

GAO, Q. *et al.* Revealing transport inequality from an activity space perspective: A study based on human mobility data. **Cities**, 131, 2022.

GARCIA, C. S. H. F. *et al.* Strategic Assessment of Lisbon's Accessibility and Mobility Problems from an Equity Perspective. **Networks and Spatial Economics**, 18, 2018. p. 415–439.

GARCIA, C. S. H. F. **Strategic Assessment of Accessibility on Urban Mobility Networks.** Instituto Superior Técnico. Lisboa. 2016.

GEURS, K. T.; VAN WEE, B. Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: review and research directions. **Journal of Transport Geography**, 12, 2004. p. 127–140.

GOLUB, A.; MARTENS, K. Using principles of justice to assess the modal equity of regional transportation plans. **Journal of Transport Geography**, 41. p. 10-20.

GOMIDE, A. Á.; GALINDO, E. P. A mobilidade urbana: uma agenda inconclusa ou o retorno daquilo que não foi. **Estudos avançados**, 27, 2013. p. 27-39.

HANDY, S.; CAO, X.; MOKHTARIAN, P. Correlation or causality between the built environment and travel behavior? Evidence from Northern California. **Transportation Research Part D**, 10, 2005. p. 427–444.

HSIEH, C.; MORETTI, E. Housing Constraints and Spatial Misallocation. **American Economic Journal: Macroeconomics**, 11, 2019. p. 1-32.

HU, L.; BENTLER, P. M. Cutoff criteria for fit indexes in covariance structure analysis: Conventional criteria versus new alternatives. **Structural Equation Modeling**, 6, 1999. p. 1-55.

INSTITUTE OF TRANSPORTATION ENGINEERS. **Transportation planning handbook**. 4°. ed. Hoboken: Wiley, 2016.

IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Tendências e desigualdades da mobilidade urbana no Brasil I: O uso do transporte coletivo e individual**. Brasília: Ipea, 2021. (Texto para discussão).

IPEA. **Desigualdades socioespaciais de acesso a oportunidades nas cidades brasileiras – 2019**. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica, 2020.

JIWATTANAKULPAISARN, P.; NOLAND, R. B.; GRAHAM, D. J. Causal linkages between highways and sector-level employment. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, 44, n. 4, 2010. p. 265–280.

JONES, P.; LUCAS, K. The social consequences of transport decision-making: clarifying concepts, synthesising knowledge and assessing implications. **Journal of Transport Geography**, 21, 2012. p. 4-16.

LITMAN, T. Evaluating Transportation Equity: Guidance for Incorporating Distributional Guidance for Incorporating Distributional. **ite journal**, 2022. p. 43-49.

LIU, R.; GUAN, C.-Q. Mode Biases of Urban Transportation Policies in China and Their Implications. **Journal of Urban Planning and Development**, 131, 2005. p. 58-70.

LOPES, A. S. **Transportes, Uso do Solo e Atividades - Modelagem Conceitual para o Planejamento da Acessibilidade Urbana**. Fortaleza: Pós Graduação em Engenharia de Transportes - UFC, 2015.

LOPES, A. S.; LOUREIRO, C. F. G.; VAN WEE, B. LUTI operational models review based on the proposition of an a priori ALUTI conceptual model. **Transport Reviews**, 2018.

LÓPEZ-MORALES, E.; SHIN, H. B.; LEES, L. Latin American Gentrifications. **Urban Geography**, 37. p. 1091-1108.

LUCAS, K. Transport and social exclusion: Where are we now? **Transport Policy**, 20, 2012. p. 105-113.

LUCAS, K.; VAN WEE, B.; MAAT, K. A method to evaluate equitable accessibility: combining ethical theories and accessibility-based approaches. **Transportation**, 43, 2016. p. 473–490.

MAGALHÃES, M. T. Q.; YAMASHITA, Y. **Repensando o Planejamento**. Texto para Discussão - Número 04. ed. [S.l.]: Universidade de Brasília, 2009.

MANOJ, M.; VERMA, A. Activity-travel behaviour of non-workers belonging to different income group households in Bangalore, India. **Journal of Transport Geography**, 49, 2015. p. 99–109.

MARGUTI, B. O. Políticas de habitação. **In: IPEA A nova agenda urbana e o Brasil: insumos para sua construção e desafios a sua implementação**. Brasília: Ipea, 2018.

MARTENS, K.; GOLUB, A.; ROBINSON, G. A justice-theoretic approach to the distribution of transportation benefits: Implications for transportation planning practice in the United States. **Transportation Research Part A**, 46, 2012. p. 684–695.

MATTIOLIA, G. *et al.* The political economy of car dependence: A systems of provision approach. **Energy Research & Social Science**, 66, 2020.

MERLIN, L. A.; SINGER, M.; LEVINE, J. Influences on transit ridership and transit accessibility in US urban areas. **Transportation Research Part A**, 150, 2021. p. 63-73.

MEYER, L. H.; ROSER, D. Enough for the Future. **In: GOSSERIES, A.; MEYER, L. H. Intergenerational Justice**. [S.l.]: Oxford, 2009. Cap. 8, p. 219–248.

MINISTÉRIO DAS CIDADES. **Gestão Integrada da Mobilidade Urbana**. Brasília: MCidades, 2006. p. 164.

MORENO-MONROY, A. I.; RAMOS, F. R. The impact of public transport expansions on informality: The case of the São Paulo Metropolitan Region. **Research in Transportation Economics**, 88, 2021.

O'SULLIVAN, D.; UNWIN, D. J. **Geographic information analysis**. 2°. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2010.

OWENS, S. From ‘predict and provide’ to ‘predict and prevent’?: pricing and planning in transport policy. **Transport Policy**, 2, 1995. p. 43-49.

PEARL, J. **Causality: Models, reasoning, and inference**. 1°. ed. UK: Cambridge University Press, 2000.

- PEARL, J.; GLYMOUR, M.; JEWELL, N. P. **Causal inference in statistics: a primer**. 1º. ed. [S.l.]: Wiley, 2016. p. 160.
- PEREIRA, R. H. M.; HERSZENHUT, D. **Introdução à acessibilidade urbana um guia prático em R**. [S.l.]: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2022.
- PEREIRA, R. H. M.; SCHWANEN, T.; BANISTER, D. Distributive justice and equity in transportation. **Transport Reviews**, 36, 2016. p. 170-191.
- PINTO, D. G. L. *et al.* Inferência Causal da Evolução dos Padrões de Escolha Modal por Classe de Renda em Fortaleza. **Anais do 35º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes**, 2021. p. 629-1641.
- PRESTON, V.; MCLAFFERTY, S. Spatial mismatch research in the 1990s: progress and potential. **Regional Science**, 78, 3 abril 1999. p. 387– 402.
- PRESTON, V.; MCLAFFERTY, S. Spatial mismatch research in the 1990s: progress and potential. **Regional Science**, 78, 1999. p. 387–402.
- PRIEMUS, H.; NIJKAMP, P.; BANISTER, D. Mobility and spatial dynamics: an uneasy relationship. **Jornal of Transport Geography**, 9, 2001. p. 167-171.
- PUCHER, J. *et al.* Urban Transport Trends and Policies in China and India: Impacts of Rapid Economic Growth. **Transport Reviews: A Transnational Transdisciplinary Journal**, 27, 2007. p. 379-410.
- RAWLS, J. **Uma teoria da justiça**. 1º. ed. São Paulo: Martins Fontes, 2000.
- ROLNIK, R. **São Paulo: o planejamento da desigualdade**. São Paulo: Fósforo, 2022.
- SANTOS, M. **A urbanização brasileira**. São Paulo: HUCITEC, 1993.
- SHI, K. *et al.* Income and commute satisfaction: On the mediating roles of transport poverty and health conditions. **Travel Behaviour and Society**, 29, 2022. p. 297–307.
- SHIPLEY, B. **Cause and Correlation in Biology: A User's Guide to Path Analysis, Structural Equations and Causal Inference with R**. 2º. ed. [S.l.]: Cambridge University Press, 2016. p. 332.
- SIQUEIRA, M. F. **Metodologia de análise dos determinantes da demanda por transportes no paradigma da inferência causal**. Universidade Federal do Ceará. [S.l.]. 2020.
- SIQUEIRA, M. F.; LOUREIRO, C. F. G.; LOPES, A. S. Diagnóstico das Relações Causa-Efeito na Mobilidade por Gênero em Grandes Cidades Brasileiras. **Transportes**, 29 (3). p. 1-14.
- SOARES, F. D. P. **A Problem Oriented Approach to Urban Transportation Planning**. University of Toronto. Department of Civil and Mineral Engineering. [S.l.]. 2022.
- SOARES, F. D. P.; LOUREIRO, C. F. G.; MILLER, E. J. **Diagnosis: A Problem-Oriented**

Approach to Urban Transportation Planning. **Transportation research board 97th annual meeting**, Washington, 2018. p. 1-6.

SOCIAL EXCLUSION UNIT. **Making the Connections: Final Report on Transport and Social Exclusion**. Londres. 2003.

SOUSA, F. F. L. M. **Diagnóstico Estratégico das Desigualdades Socioespaciais ao Trabalho em Fortaleza**. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza. 2019.

UNITED NATIONS. **World urbanization prospects - The 2018 Revision**. United Nations Department of Economic and Social Affairs. Nova York, p. 126. 2019.

VAN ACKER, V.; WITLOX, F.; VAN WEE, B. The Effects of the Land Use System on Travel Behavior: A Structural Equation Modeling Approach. **Transportation Planning and Technology**, 30, n. 4, 2007. p. 331-353.

VAN WEE, B. Accessibility and equity: A conceptual framework and research agenda. **Journal of Transport Geography**, 104, 2022.

VAN WEE, B.; GEURS, K. T. Discussing equity and social exclusion in accessibility evaluations. **European Journal of Transport and Infrastructure Research**, 11, 2011. p. 350–367.

VASCONCELOS, P. A.; CORRÊA, R. L.; PINTAUDI, S. M. **A cidade contemporânea: segregação espacial**. 1º. ed. São Paulo: Contexto, 2016.

WASHINGTON, S. *et al.* **Statistical and Econometric Methods for Transportation Data Analysis**. 3º. ed. [S.l.]: CRC Press, 2020.

WESTREICH, D.; GREENLAND, S. The Table 2 Fallacy: Presenting and Interpreting Confounder and Modifier Coefficients. **American Journal of Epidemiology**, 177, 2013. p. 292–298.

WILLSON, R. Assessing communicative rationality as a transportation planning paradigm. **Transportation**, 28, 2001. p. 1-31.