



# **ANÁLISE DOS EFEITOS CAUSAIS DAS RESTRIÇÕES DE USO DO SOLO E TRANSPORTES SOBRE AS DESIGUALDADES SOCIOESPACIAIS NA ACESSIBILIDADE EM FORTALEZA**

**Matheus Fontenelle Siqueira**

**Davi Garcia Lopes Pinto**

**Maria Cristina Cavalcante Belo**

**Carlos Felipe Grangeiro Loureiro**

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes

Universidade Federal do Ceará

**Francelino Franco Leite de Matos Sousa**

Centro Universitário Christus

## **RESUMO**

O papel central do diagnóstico das desigualdades socioespaciais da acessibilidade consiste em apresentar evidências empíricas de explicações - advindas dos transportes e do uso do solo - para as diferenças nos níveis de acesso às oportunidades no espaço, entre grupos sociais e no tempo. O paradigma da inferência causal mostra-se atrativo nesse contexto, oferecendo um caminho operacional para sistematizar as análises de causa-efeito nessa problemática. Apoiado nesse paradigma, este trabalho visa propor um método de análise das relações causais no diagnóstico estratégico da acessibilidade urbana, bem como avançar na compreensão dos efeitos das inadequações no uso do solo e das ineficiências na oferta de transportes sobre as desigualdades socioespaciais na acessibilidade em Fortaleza. Os resultados do estudo de caso apontaram para uma heterogeneidade de processos causais entre grupos sociais e entre recortes temporais, sendo as restrições de uso do solo preponderantes na explicação das desigualdades na acessibilidade em Fortaleza.

## **ABSTRACT**

The central role of the diagnosis of socio-spatial inequalities of accessibility consists in presenting empirical evidence of explanations - arising from transportation and land use - for differences in levels of access to opportunities in space, between social groups and over time. The paradigm of causal inference is attractive in this context, offering an operational way to systematize the cause-effect analyses in this problematic issue. Supported by such a paradigm, this work aims to propose a method to analyze causal relations in the strategic diagnosis of urban accessibility, as well as to advance in the understanding of the effects of inadequacies in land use and inefficiencies in transportation supply on socio-spatial inequalities in accessibility in Fortaleza. The results of the case study pointed to a heterogeneity of causal processes among social groups and between time periods, with land use restrictions being preponderant in explaining inequalities in accessibility in Fortaleza.

## **1. INTRODUÇÃO**

O paradigma atual de planejamento urbano integrado do uso do solo e transportes almeja o desenvolvimento socioespacial sustentável, com promoção equitativa da distribuição de acesso às oportunidades de atividades (Bertolini *et al.*, 2005; Pereira *et al.*, 2017; Garcia *et al.*, 2018). Portanto, seus esforços analíticos devem centrar na problemática das desigualdades socioespaciais na acessibilidade, que se materializam em padrões de mobilidade de pessoas e cargas, podendo vir a acarretar: externalidades de ordem econômica, uma vez que piores níveis de acessibilidade estão associados a menor empregabilidade (Johnson *et al.*, 2017); de cunho ambiental, dado que induz padrões de mobilidade produzida por modos motorizados, agravando problemas de congestionamento, mortalidade no tráfego e poluição atmosférica (Bosetti *et al.*, 2014); e, em sua condição mais extrema, problemas de exclusão social (Lucas, 2012).

Além de reconhecer essa problemática como foco do planejamento urbano integrado, o paradigma da acessibilidade sustentável também preconiza como um dos seus principais produtos a compreensão, a partir de análises de diagnóstico no nível estratégico, das relações causais que determinam os problemas de desigualdades socioespaciais na acessibilidade



(Soares *et al.*, 2018). A essas desigualdades, atribui-se como principais determinantes, em um nível agregado do território urbano, as inadequações no uso do solo, materializadas na forma de *spatial mismatch*, e as ineficiências na oferta de transportes, decorrentes de uma distribuição desigual de infraestrutura de transporte público e da malha viária (Garcia *et al.*, 2018).

Em Fortaleza, esforços de pesquisa têm apontado que a evolução desses determinantes ao longo das últimas duas décadas vem contribuindo para o aumento das desigualdades na acessibilidade (Sousa, 2019). No uso do solo, identifica-se, nesse período, uma intensificação de um processo de periferização da população de renda mais baixa (Andrade *et al.*, 2020), reforçado por políticas públicas habitacionais que afastaram esses grupos das centralidades (Castro *et al.*, 2021); além da manutenção de uma forte concentração das oportunidades na região central da cidade, predominantemente povoada por segmentos de renda mais alta (Lima *et al.*, 2021). Esse período foi marcado, ainda, por grandes investimentos em infraestrutura viária, notadamente na ampliação da malha viária no eixo leste da cidade, favorecendo a parcela mais rica da população, combinada com políticas públicas de implantação de corredores de ônibus e operacionalização de duas linhas de metrô na porção mais a oeste do município, com potencial para melhorar os níveis de acessibilidade do grupo menos favorecido economicamente (Freire *et al.*, 2019). Essa distribuição desigual do provimento de infraestrutura de transportes no território, associada a diferenças relativas inerentes ao desempenho dos diferentes modos, reforçam ainda mais a condição de desigualdades socioeconômicas no acesso às atividades.

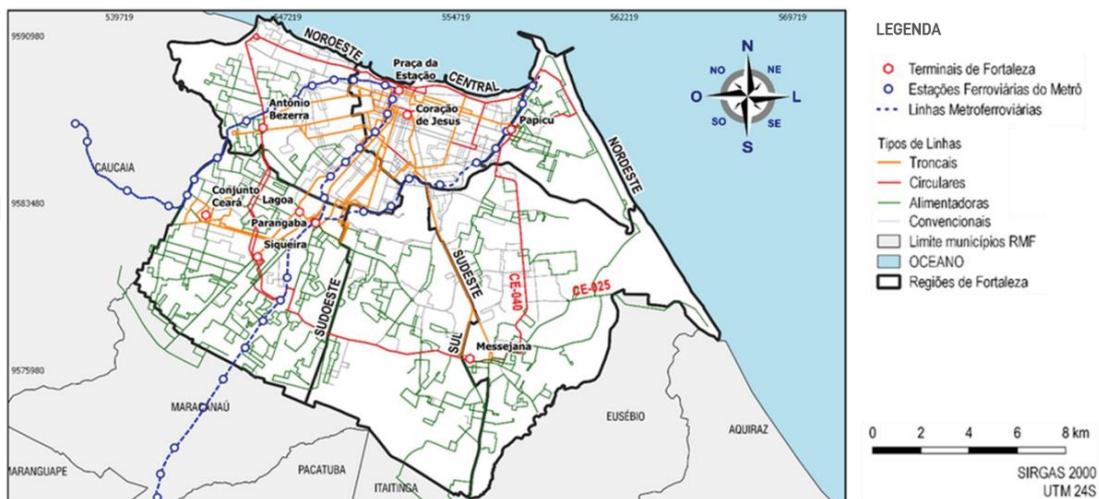
Embora os retratos (caracterizações) da distribuição espacial dos níveis de acessibilidade e das restrições inerentes ao uso do solo e transportes corroborem as explicações teóricas postas para essa problemática em Fortaleza, é papel do diagnóstico apresentar evidências empíricas de causalidade, oferecendo explicações para as diferenças nos níveis de acessibilidade no espaço, entre grupos sociais, e entre recortes temporais (Garcia *et al.*, 2018). Sousa (2019) propôs, em seu método de diagnóstico estratégico, uma análise exploratória seguida da estimação de modelos estatísticos confirmatórios, adotando medidas de correlação espacial e de regressão geponderada. Reconhece-se, entretanto, a limitação desse ferramental em atribuir efeitos causais aos coeficientes estimados, dada a complexidade da problemática e as estreitas relações entre o uso do solo e as redes de transportes das cidades. Nesse sentido, o paradigma da Inferência Causal (Pearl, 2000) mostra-se atrativo, oferecendo um caminho operacional para sistematizar a investigação de hipóteses de causa-efeito que permite superar essas limitações metodológicas antes existentes no processo de diagnóstico das desigualdades na acessibilidade.

Buscando incorporar a lógica da inferência causal no processo de diagnóstico estratégico da problemática urbana, assim como avançar, este artigo investiga a evolução das relações de causa-efeito entre a acessibilidade e suas determinantes na capital cearense nas últimas duas décadas, considerando diferentes grupos socioeconômicos. Essa investigação parte do resgate acerca das mudanças ocorridas nos subsistemas de uso do solo e transportes nesse período (Seção 2), buscando estabelecer as bases conceitual e fenomenológica para a elaboração de mapas mentais detalhando os mecanismos causais hipotetizados. Na Seção 3, apresenta-se a proposta metodológica para a adequada estimação desses efeitos, baseada no paradigma da inferência causal. Os resultados obtidos são apresentados e discutidos na Seção 4, na qual são analisados os efeitos estimados e suas implicações para a compreensão dessa problemática. A Seção 5 conclui com as principais contribuições do trabalho e sugestões para contribuições futuras.

## 2. EVOLUÇÃO DOS DETERMINANTES DAS DESIGUALDADES SOCIOESPACIAIS NA ACESSIBILIDADE EM FORTALEZA

O processo de investigação de efeitos causais deve partir da consolidação conceitual *a priori* acerca das explicações oferecidas pela literatura quanto ao estado atual de conhecimento sobre o fenômeno de interesse. Em particular, a problemática das desigualdades socioespaciais da acessibilidade em Fortaleza, enquanto objeto do planejamento de transportes, tem sido amplamente caracterizada pela comunidade científica, não somente em termos da distribuição espacial dos níveis de acessibilidade, como da relação desses níveis com os processos urbanos atrelados aos subsistemas de uso do solo e transportes, e da sua relação com os grupos de baixa e alta renda. Nesta seção, apresenta-se um breve resgate desses esforços, buscando-se justificar hipóteses de processos causais que serão objetos de investigação ao longo do presente artigo.

Em Fortaleza, assim como em diversas metrópoles brasileiras, constata-se um contexto desigual de acesso às oportunidades, que favorece os grupos de maior renda em detrimento dos grupos vulneráveis (Pereira *et al.*, 2019). Os maiores níveis de acessibilidade ocorrem na região Central da cidade (Figura 1), que concentra uma parcela significativa dos domicílios de alta renda. Essa região corresponde aos núcleos mais antigos de povoamento da cidade, cuja mancha urbana foi se expandindo em direção às outras regiões e às fronteiras da cidade ao longo de décadas.



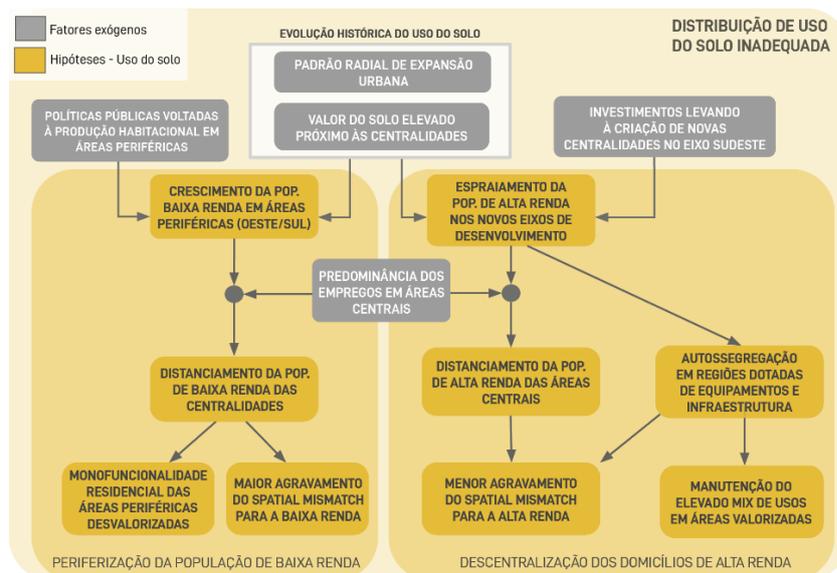
**Figura 1:** Divisão espacial do território de Fortaleza. Fonte: Adaptado de Lima *et al.* (2021)

### 2.1. Evolução dos efeitos das inadequações na distribuição do uso do solo

Fortaleza teve um desenvolvimento urbano com padrões comuns a outras cidades brasileiras, marcado pela segregação residencial dos grupos socioeconômicos mais vulneráveis, os quais são impostos a um crescente afastamento das oportunidades de trabalho e atividades sociais (Freitas e Pequeno, 2015). Essa desconexão entre os locais de moradia e a localização das oportunidades, tratada na forma de *spatial mismatch*, impõe aos grupos de baixa renda menores níveis de acesso, com prejuízos à sua qualidade de vida (Rolnik e Nakano, 2009). A ocorrência do *spatial mismatch* esteve associada, além do processo de periferização da população de baixa renda, à expansão e esvaziamento das centralidades da cidade. De acordo com Castro *et al.* (2021), apesar de ter havido uma consolidação de novas centralidades nas últimas décadas, isso não foi suficiente para reduzir a forte concentração das oportunidades de trabalho na região Central da cidade. Concomitantemente, tem-se observado uma intensificação do processo de periferização da população menos favorecida, que passou a ocupar com mais intensidade as franjas da cidade situadas nas regiões Noroeste e Sudoeste.

De forma complementar à segregação imposta aos segmentos de renda mais baixa, identifica-se um processo de segregação voluntária dos grupos de maior renda (Villaça, 1998), que passaram a se espriar para regiões situadas no vetor Sudeste da cidade. O espriamento do grupo de alta renda está atrelado, entretanto, aos novos eixos de desenvolvimento da cidade, situados juntos a equipamentos públicos e privados instalados em um solo constantemente valorizado, o que torna inviável economicamente a ocupação dessas áreas pela baixa renda.

Essa configuração espacial resulta no que Lima *et al.* (2021) classifica como uma “Cidade dos Ricos”, onde a concentração da maior parte das oportunidades resulta em melhores níveis de acessibilidade, e uma “Cidade dos Pobres”, monofuncional, com níveis inferiores de acesso às oportunidades. O processo de formação dessas duas “realidades” é um dos prováveis motivos pelos quais, apesar das melhorias significativas nos níveis absolutos de acessibilidade em todo o território entre os anos 2000 e 2015, tenha se observado um aumento das desigualdades socioespaciais na acessibilidade, especialmente às oportunidades de trabalho (Sousa, 2019). Na Figura 2, apresenta-se as hipóteses de causalidade acerca da influência das restrições na distribuição de uso do solo no aumento dessas desigualdades em Fortaleza.



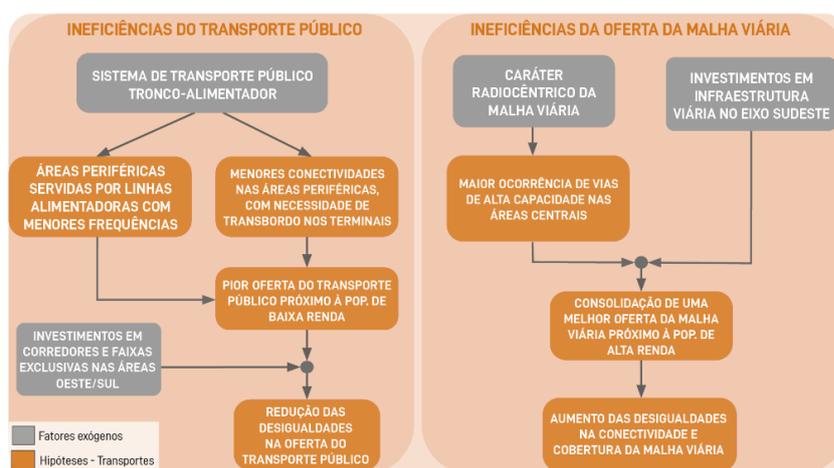
**Figura 2:** Hipóteses de causalidade da evolução das inadequações no uso do solo

## 2.2. Evolução dos efeitos da distribuição da oferta de transportes

Assim como a distribuição territorial das atividades, a oferta de transportes em Fortaleza também apresenta distribuição espacial desigual (Sousa, 2019). Além da maior presença de eixos viários de alta capacidade na área central, observa-se uma concentração de investimentos na melhoria da malha viária no vetor Sudeste da cidade, com a expansão de vias de conexão à região Central. Esse caráter radioconcêntrico, além de seletivo, dos investimentos reforçou a distribuição desigual dessa oferta sobre o território urbano, especialmente em termos de conectividade, que é bem mais consolidada na região Central quando comparada com a das áreas periféricas. Tais melhorias, além de favorecerem sobretudo os estratos populacionais mais ricos, acabam por acarretar uma valorização fundiária das regiões Nordeste e, especialmente, Sudeste da cidade, principal eixo de espriamento dos mais ricos (Lima *et al.*, 2021). Esse processo contribuiu para reforçar a gradual “expulsão” da população de menor renda para regiões mais periféricas, reforçando ainda mais suas condições desiguais de acesso às atividades urbanas (Andrade *et al.*, 2020).

Com o intuito de atender principalmente a população de baixa renda residente nas áreas periféricas a oeste da cidade, a ampliação da rede de transporte público nos últimos anos foi mais intensa nessa região, com a construção de corredores de BRT e de faixas exclusivas para ônibus, além da operacionalização de duas linhas de metrô. Apesar dessas intervenções, a estrutura da rede de transporte público de Fortaleza, baseada em um sistema tronco-alimentador (Figura 1), tende a elevar os tempos de espera nas linhas alimentadoras e induzir o transbordo em terminais físicos de integração nas viagens periferia-centro, o que vem penalizando de maneira mais intensa a população residente nas áreas periféricas, gerando uma condição de desigualdade em relação à área central, mais bem provida de infraestrutura (Lima *et al.* (2021)).

Se a desigual distribuição nos investimentos realizados em infraestrutura de transportes acabou induzindo a níveis desiguais de acessibilidade no espaço, as condições socioeconômicas dos distintos grupos de renda também se modificaram nesse período, acarretando em mudanças no contexto de acesso aos modos motorizados individuais. Dentre os grupos de renda mais alta, a proporção de indivíduos com acesso ao automóvel se manteve aproximadamente constante nas últimas décadas, mantendo-se a priorização pelo modo motorizado individual. Por outro lado, a proporção de indivíduos de baixa renda com acesso a carros e motos saiu de 9% no ano 2000 para 23% em 2015 (Pinto *et al.*, 2021), fato esse que tende a atuar no sentido de reduzir as desigualdades entre grupos socioeconômicos. Entretanto, a menor oferta da malha viária em áreas periféricas e os restritos eixos de transporte tendem a gerar penalizações diferenciais para os grupos de baixa renda. Além disso, o fato de a maior parte dos indivíduos de baixa renda ainda permanecer cativa de transporte público faz com que essas desigualdades se mantenham elevadas, dado que, apesar da melhoria em termos absolutos da acessibilidade pelos grupos cativo e não-cativo, as diferenças de acessibilidade entre eles ainda permanecem consideráveis (Castro *et al.*, 2021). Apoiando-se nas evidências empíricas sintetizadas acima, a Figura 3 apresenta as hipóteses levantadas acerca da evolução das ineficiências na oferta da malha viária e de transporte público em Fortaleza, e como essas restrições podem estar contribuindo para o aumento das desigualdades socioespaciais na acessibilidade na cidade.



**Figura 3:** Hipóteses de causalidade da evolução das ineficiências na oferta de transportes

### 3. MÉTODO DE ANÁLISE DAS RELAÇÕES DE CAUSALIDADE

Como argumentado acima, a análise das relações causais das desigualdades socioespaciais na acessibilidade em Fortaleza se insere dentro do paradigma mais atual de planejamento urbano, que destaca os conhecimentos produzidos nesse esforço como uma das principais contribuições do processo de diagnóstico. Na metodologia de diagnóstico estratégico proposta por Sousa



(2019), reconhece-se a necessidade de compreender como os níveis de acessibilidade se diferenciam: (i) no território, frente às restrições de uso do solo e transportes; (ii) entre grupos sociais com restrições individuais distintas; e (iii) entre gerações, refletindo sua evolução temporal. Dessa forma, o método aqui descrito busca investigar como os processos causais da problemática analisada variam nessas três dimensões, com o intuito de produzir conhecimento acerca desse fenômeno para que dê suporte no esforço de planejamento estratégico da cidade.

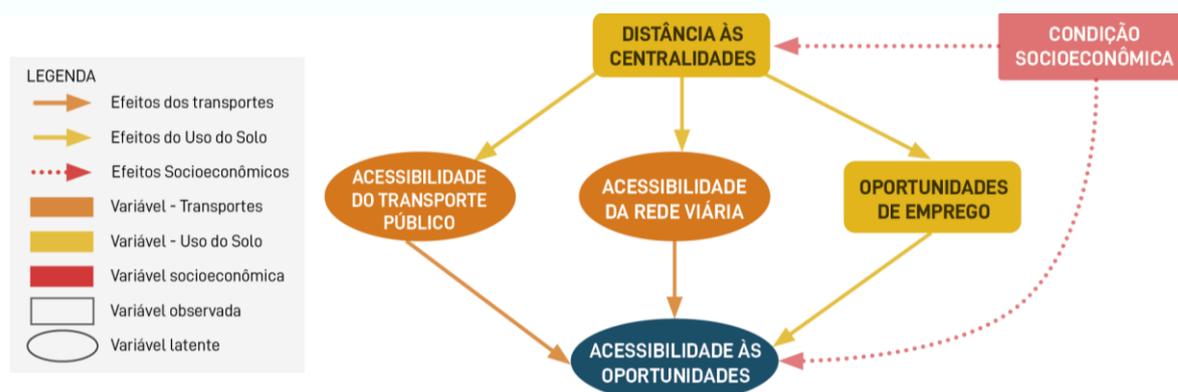
A dimensão espacial foi incorporada subdividindo-se o município de Fortaleza em 243 zonas de tráfego, nível de agregação no qual foram calculados os indicadores de acessibilidade, uso do solo e oferta de transportes, a serem apresentados na sequência. Para o cálculo dos indicadores de acessibilidade, considerou-se uma estratificação da população em três grupos: *alta renda*, *baixa renda cativa* e *não cativa* do transporte público. Partiu-se do entendimento de que, em Fortaleza, a condição socioeconômica tem importante papel no acesso às oportunidades e na produção de desigualdades, restringindo a participação em atividades e o acesso aos modos. Os estratos foram definidos a partir do Critério Brasil (ABEP, 2015), assumindo que o segmento de baixa renda corresponde a 60% dos domicílios com a menor renda da cidade, representando a união das classes C2, D e E; já o grupo de alta renda corresponde aos 10% dos domicílios com a maior renda, representando a união das classes A e B1. A classificação do grupo de baixa renda como *não-cativo* ou *cativo* do transporte público se dá pela posse ou não de veículos motorizados no domicílio, respectivamente.

Por fim, com o intuito de compreender como os efeitos dos determinantes das desigualdades socioespaciais na acessibilidade evoluíram nos últimos anos, foram analisados dois recortes temporais, anos de 2000 e 2015. Entende-se que o período entre esses dois recortes é suficientemente longo para permitir capturar as alterações de uso do solo e da infraestrutura de transportes em Fortaleza, conforme descrito na Seção 2, como também adequado em termos da disponibilidade de dados, sobretudo para o recorte temporal mais antigo.

O método desenvolvido encontra-se descrito nas subseções seguintes. Adota-se uma abordagem baseada na teoria da inferência causal (Pearl, 2000), partindo das justificativas empíricas e dos mapas mentais formulados na Seção 2, que subsidiam a construção de um diagrama causal que formaliza as hipóteses de causalidade, como proposto por Siqueira (2020). A partir do diagrama causal, definem-se os indicadores para cada variável, isto é, indicadores de acessibilidade, uso do solo e oferta de transportes. A complexidade da problemática, com prováveis relações de causa-efeito diretas e indiretas, bem como a necessidade do controle da endogeneidade, torna necessário o uso de modelos estatísticos multivariados para a investigação empírica das hipóteses de causalidade, motivo pelo qual se adotou a Modelagem de Equações Estruturais.

### **3.1. Construção do diagrama causal**

Os mapas mentais acerca das influências das restrições de uso do solo e transportes na problemática da acessibilidade formaram a base para a construção de um diagrama causal (Figura 4), que apresenta três principais determinantes para os níveis de acessibilidade: *a oferta do transporte público*, *da malha viária*, e *a concentração de oportunidades por zona*. Diagramas causais, além de explicitarem as relações de causalidade hipotetizadas, permitem identificar efeitos diretos e indiretos de interesse, bem como as fontes de confundimento envolvidas, que podem trazer viés nas estimativas (Shiple, 2016).



**Figura 4:** Diagrama causal dos efeitos de uso do solo e transportes na acessibilidade

Em particular, Fortaleza demonstra um padrão de uso do solo com concentração de oportunidades na área central (Sousa, 2019), que por sua vez agrega grande parcela da população de alta renda e possui melhores níveis de oferta viária e de transporte público. A provável correlação na disposição espacial desses determinantes torna central a necessidade de trazer uma variável de controle que bloqueie os caminhos de *back-door* (Pearl, 2000), isto é, os caminhos causais espúrios (de confundimento) às relações de interesse do estudo. Assim, considerou-se uma variável que capture a distância às centralidades, como métrica de periferação das zonas. Por outro lado, a condição socioeconômica foi controlada por meio da segmentação de amostra, adotando os critérios previamente apresentados. Isso se faz necessário não somente devido às questões de confundimento, mas também porque as oportunidades de emprego são entendidas como específicas por estrato; bem como a métrica de acessibilidade, que deve, idealmente, capturar as percepções e os modos disponíveis para cada grupo.

### 3.2. Definição dos indicadores

A construção dos indicadores representados no diagrama causal foi feita com base na composição de variáveis obtidas a partir de dados observacionais e modelados (Tabela 1), tendo como um de seus maiores condicionantes a disponibilidade de dados, sobretudo em 2000.

**Tabela 1:** Descrição das variáveis definidas para mensurar cada indicador do diagrama causal

Variável	Indicador (por zona)	Código	Fonte(s)
Acessibilidade	Indicador de acessibilidade baseado em logsum	Aces_Desut	Sousa (2019)
Oportunidades de emprego	Razão da quantidade de empregos em uma determinada zona disponível para um grupo populacional, dividido pela área da zona	EMP	Sousa (2019) PNAD-IBGE RAIS-MTE
Distância às centralidades	Distância euclidiana média ponderada pelas oportunidades de empregos das centralidades	DIS	Sousa (2019)
Acessibilidade da rede viária	Densidade de km de vias (cobertura)	MV_COB	Sousa (2019)
	Densidade de interseções (conectividade)	MV_CON	SEFIN-For
	Densidade de vias arteriais e expressas (vias de alta capacidade)	MV_AL_CA	SEUMA-For
Acessibilidade da rede de TP	Soma da frequência das linhas de alta capacidade na hora-pico	TP_AL_CA	ETUFOR CBTU
	Tempo médio de viagem (total) para todas as demais zonas	TP_ACESS_TT	
	Tempo médio de espera nas paradas	TP_ACESS_WT	

Os níveis de acessibilidade foram mensurados por um indicador de acessibilidade ativa baseado em *logsum*, que permite incorporar a variação nos níveis de acessibilidade no espaço e entre grupos socioeconômicos distintos, considerando os diferentes modos disponíveis e as percepções inerentes a cada grupo. O *logsum*, métrica obtida a partir de modelos de escolha discreta implementados em modelo LUTI (Sousa, 2019), permite capturar a percepção das



impedâncias atreladas ao custo e tempo de viagem (e eventuais tempos de acesso, transbordo e difusão), considerando as alternativas de modo/rota disponíveis. A Equação 1 apresenta a formulação matemática do indicador utilizado de acessibilidade ( $ACCESS_{n,m,t,i}$ ) de uma dada zona de origem  $i$ , de cada grupo populacional  $n$ , para cada tipo de emprego  $m$ , em um tempo  $t$ .  $Emp_{t,m,j}$  representa a quantidade de empregos em uma dada zona de destino  $j$ ;  $Dom_{t,n,i}$  a quantidade de domicílios; e  $Coef$  equivale aos coeficientes intersetoriais de uma matriz input-output modelada que permitem classificar os empregos de acordo com o grupo populacional a que se destinam.

$$ACCESS_{n,m,t,i} = \frac{\sum_j Emp_{t,m,j}}{\sum_j Dom_{t,n,i}} \cdot \frac{\sum_j [logsum_{n,t,i,j} * \sum_m (Coef_{t,m,n} * Emp_{t,m,j})]}{\sum_j (Coef_{t,n,m} * Emp_{t,m,j})} \quad (1)$$

Para representar as restrições relacionadas às inadequações do uso do solo, foram determinados dois indicadores: densidade de empregos e distância às centralidades, sendo esse último calculado pela distância euclidiana média ponderada aos empregos de 49 zonas com maior concentração de oportunidades (Sousa, 2019). A adoção da distância euclidiana permite isolar os efeitos advindos da rede viária, sendo uma métrica essencialmente de uso do solo. Ressalta-se que, para ambos os indicadores, não foi possível diferenciar empregos atrelados à baixa renda cativa e não-cativa, que foram assumidos iguais ao universo populacional da baixa renda.

Diferentemente do uso do solo, a representação das ineficiências na oferta de transportes foi realizada através de variáveis latentes, em decorrência de duas razões principais: (i) essa estratégia permite capturar, através de múltiplos indicadores, a complexidade da oferta das redes de transportes; e (ii) as latentes permitem incorporar os erros de medição, fato que é particularmente relevante para os dados do ano 2000, que têm menor confiabilidade. A esse respeito, uma das grandes dificuldades encontradas foi a recuperação dos dados históricos de 2000 das redes de transporte. A estratégia adotada consistiu na combinação de dados de fontes diversas: (a) indicadores calculados por Sousa (2019), que também reconheceu as dificuldades de qualidade dos dados de 2000; (b) dados de cartografia de 1995 de Fortaleza, vindos da Secretaria de Urbanismo e Meio Ambiente de Fortaleza (SEUMA-For); e (c) dados da rede de simulação em EMME/2 utilizada para modelagem da demanda por transportes em Fortaleza (CBTU, 1996), extraída através de programa computacional em R, sendo fonte particularmente relevante dos dados do sistema de ônibus de Fortaleza no fim da década de 1990.

### 3.3. Análises de Moran Bivariado

Antes de conduzir a modelagem confirmatória, realizou-se análises de correlação espacial com Moran Bivariado. Trata-se de um coeficiente de autocorrelação espacial que permite averiguar a magnitude de associação da acessibilidade com cada uma de suas restrições hipotetizadas, com interpretações análogas à da correlação simples. A escolha metodológica de adotar o Moran Bivariado em detrimento de uma correlação de Pearson ou Spearman decorre do caráter inerentemente espacial da acessibilidade, e da consequente autocorrelação espacial observada em Fortaleza (Sousa, 2019). Assumindo estrutura de vizinhança com zonas imediatamente vizinhas, calculou-se esses indicadores através do software GEODA (Anselin, 2017).

### 3.4. Modelagem de equações estruturais (SEM)

O ferramental estatístico adotado para estimar a magnitude dos efeitos das relações de causalidade hipotetizadas foi a modelagem SEM. Suas principais vantagens em relação a outras ferramentas de modelagem estatística são a possibilidade de estimação de efeitos diretos e indiretos através de uma análise multivariada dos determinantes analisados, além de possibilitar



a incorporação de variáveis de difícil mensuração através da utilização de variáveis latentes (Hoyle, 2012). A representação de variáveis latentes no modelo SEM é realizada através da formulação de modelos de mensuração, que podem ser classificados como formativos ou reflexivos (Grace e Bollen, 2008), a depender da direção de causalidade hipotetizada entre os indicadores (I) e a latente (L). Se a teoria justificar uma relação  $I \rightarrow L$ , ou seja, a variável latente é consequência comum das indicadores, então a latente é *formativa*; sendo essencial que se apresente todas as causas da latente pertinentes ao fenômeno de estudo. Por outro lado, relações de causalidade hipotetizadas como  $L \rightarrow I$  levam a variáveis *reflexivas*, onde a variável latente é causa comum das indicadores e, portanto, fonte da correlação entre elas. Neste estudo, as variáveis de acessibilidade do transporte público e rede viária foram associadas a latentes *reflexivas*, interpretando-se os indicadores adotados como consequências da disposição espacial das respectivas redes de transporte e de suas características de oferta. Desse modo, associa-se a cada indicador um erro de mensuração ( $\epsilon$ ), que traduz a parcela de sua variação que não é explicada pela sua latente. Os resultados dos modelos de mensuração, isto é, os coeficientes de regressão de equações do tipo  $I = f(L) + \epsilon$ , permitem interpretar a estrutura correlacional entre os indicadores, gerando um conhecimento complementar acerca de cada construto.

Além dos modelos de mensuração, os modelos SEM são compostos por modelos estruturais, que traduzem na linguagem estatística as relações de causalidade codificadas no diagrama causal. Tais modelos consistem, de forma simplificada, em equações do tipo *Efeito* =  $f(\text{Causa})$ , isto é, para cada variável endógena (explicada) no modelo, associa-se uma equação estrutural que representa as causas presentes no diagrama causal. Incorpora-se, ainda, um componente de erro residual nas variáveis endógenas, para representar eventuais fatores explicativos dessas variáveis que não foram sistematizados. Por fim, reconhecendo a existência de variações temporais e entre grupos sociais nos mecanismos causais, utilizou-se uma abordagem SEM multigrupo para estimar seis modelos diferentes: baixa renda cativa, baixa renda não cativa e alta renda, para 2000 e 2015. Essa abordagem permite estimar conjuntamente os resultados para esses estratos, possibilitando a sua comparabilidade. Adotou-se estimadores robustos de máxima verossimilhança, admitindo a provável não-normalidade multivariada dos dados, e aplicou-se, na estimação, pesos referentes à quantidade de domicílios de cada grupo por zona.

## 4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 4.1. Análises de correlação espacial bivariada

A Tabela 2 reúne as estimativas de Moran Bivariado entre o indicador de acessibilidade e os indicadores das restrições, bem como outras variáveis julgadas relevantes para interpretar a problemática das desigualdades socioespaciais na acessibilidade. Essas estimativas foram obtidas de Sousa (2019) para o ano de 2015, e complementadas para 2000 considerando os indicadores calculados com outras fontes de dados.

Os resultados apontam que locais mais periféricos, isto é, com maiores distâncias às centralidades (DIST), apresentam piores níveis de acessibilidade. O fenômeno do *spatial mismatch* pode ser interpretado considerando que locais com maior quantidade de empregos (EMP) tem maiores níveis de acessibilidade, mas a correlação entre estes e os domicílios (DOM) só é significativa e positiva para a alta renda. Destaca-se, ainda, que a heterogeneidade das correlações entre os grupos socioeconômicos e entre os recortes temporais é um indício que corrobora a necessidade da análise segmentada através do SEM multigrupo. Nesse sentido, observa-se uma maior similaridade das estimativas da baixa renda não-cativa com a alta renda, trazendo indícios da relevância da posse de veículos sobre a acessibilidade em Fortaleza.

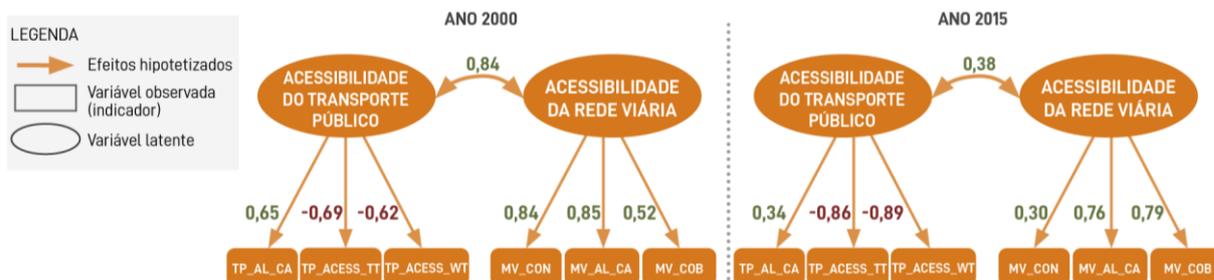
**Tabela 2:** Resultados das análises de Moran Bivariado por estrato

Correlação espacial	2000			2015		
	Baixa Renda Cativa	Baixa Renda Não-Cativa	Alta Renda	Baixa Renda Cativa	Baixa Renda Não-Cativa	Alta Renda
Aces_Desut x DIST	-0,66	-0,79	-0,82	-0,58	-0,72	-0,87
Aces_Desut x DOM	-0,09	-0,03	0,53	-0,02	0,00	0,47
Aces_Desut x EMP	0,49	0,56	0,59	0,30	0,37	0,49
Aces_Desut x MV_AL_CA	0,34	0,34	0,31	0,33	0,40	0,51
Aces_Desut x MV_COB	0,32	0,39	0,35	0,28	0,37	0,49
Aces_Desut x MV_CON	0,46	0,52	0,52	0,26	0,32	0,35
Aces_Desut x TP_ACESS_TT	-0,46	-0,62	-0,64	-0,19	-0,27	-0,36
Aces_Desut x TP_ACESS_WT	-0,23	-0,36	-0,35	-0,23	-0,31	-0,37
Aces_Desut x TP_AL_CA	0,37	0,40	0,40	0,33	0,41	0,50
DOM x EMP	0,00	0,00	0,45	-0,07	-0,07	0,38

#### 4.2. Modelagem de equações estruturais

Os modelos SEM foram estimados através do pacote *lavaan*, em R, considerando 232 observações válidas de zonas por estrato, cada uma contendo dados de 9 indicadores. Nesse tipo de abordagem, os dados de entrada fornecidos para o modelo não são, a rigor, as observações por zona, mas a estrutura associativa entre as variáveis, ou seja, as matrizes de covariância. Assim, dada a estrutura simétrica dessas matrizes, e a estratificação em seis grupos, considerou-se 324 pedaços de informação, sendo 270 correlações e 54 interceptos (embora as variáveis sejam padronizadas com média nula, essa informação é importante em modelos multigrupo). Os modelos estimados totalizaram 192 parâmetros nos 6 grupos e 132 graus de liberdade, e demonstraram oferecer explicações adequadas para o fenômeno, haja vista as pequenas discrepâncias entre as matrizes de covariância modelada e observada. Como consequência, verificou-se bons índices de ajuste do modelo (GFI: 0,99).

Os modelos de mensuração mostraram-se eficazes na representação dos construtos relativos à infraestrutura de transporte público e malha viária (Figura 5). Conforme esperado, a acessibilidade do transporte público é maior em locais com serviço de linhas de alta capacidade e onde ocorrem menores tempos médios de viagem e espera; já a acessibilidade da malha viária tem correlação positiva com a cobertura, a conectividade e a presença de eixos viários de alta capacidade. Comparando os recortes temporais, observa-se que a correlação entre as latentes reduziu de 2000 para 2015 (0,84 para 0,38), o que pode ser explicado pela ocorrência de investimentos em diferentes porções da cidade para cada rede (lado oeste, para o transporte público; lado leste, para a malha viária).



**Figura 5:** Resultados da estimação dos modelos de mensuração (estimativas padronizadas)

Os modelos estruturais estimados (Tabela 3) permitiram corroborar a hipótese de heterogeneidade de efeitos causais entre grupos socioeconômicos e no tempo, evidenciando as mudanças ocorridas em Fortaleza entre 2000 e 2015. As desigualdades espaciais na oferta de



transportes e no uso do solo ficam evidentes pelos elevados graus de associação (negativa) da distância às centralidades com os respectivos indicadores das restrições (i a iii), reforçando que as áreas periféricas (habitadas prioritariamente pela baixa renda) são mais penalizadas.

Analisando os efeitos das restrições sobre a acessibilidade (iv a vii), percebe-se, em todos os estratos analisados, uma preponderância de efeitos advindos da distância às centralidades, e um impacto secundário dos transportes. Esse achado evidencia a distinção entre correlação e causalidade nesse fenômeno pois, embora os indicadores de transporte tenham correlação significativa com a acessibilidade (Tabela 2), trata-se de um resultado que se confunde com a distribuição do uso do solo, que segue padrões similares em Fortaleza. Assim, há indícios para interpretar que as causas raízes das desigualdades na acessibilidade estão mais atreladas ao uso do solo do que aos transportes. Comparando os recortes temporais, percebe-se que a influência da distância às centralidades aumenta em 2015, sobretudo para a baixa renda, o que é interpretado como consequência do processo de periferação; para a alta renda, o leve aumento traduz a menor escala do processo de segregação voluntária para a região Sudeste da cidade.

**Tabela 3:** Resultados da estimação dos modelos estruturais (estimativas padronizadas)

#	Consequência	Causa	Baixa Renda Cativa		Baixa Renda Não-Cativa		Alta Renda	
			2000	2015	2000	2000	2000	2015
i	acess_MV	distCentr	-0,59*	-0,79*	-0,59*	-0,79*	-0,62*	-0,81*
ii	acess_TP	distCentr	-0,84*	-0,37*	-0,84*	-0,37*	-0,77*	-0,60*
iii	empregos	distCentr	-0,62*	-0,61*	-0,62*	-0,61*	-0,63*	-0,68*
iv	acessibilidade	distCentr	-0,52*	-0,64*	-0,63*	-0,79*	-0,77*	-0,80*
v	acessibilidade	acess_MV	0,26*	-0,11	0,17*	-0,07	0,07	0,11
vi	acessibilidade	acess_TP	-0,20*	0,02	-0,04	0,01	0,08	0,06
vii	acessibilidade	empregos	0,19*	0,04	0,16*	0,03	0,03	0,03

\*Estimativa significativa com  $\alpha=5\%$

Embora uma quantidade maior de empregos seja ofertada em áreas acessíveis (Tabela 2), não é a quantidade de empregos de uma zona que explica, efetivamente, a sua acessibilidade, mas o contexto espacial da zona frente às centralidades da cidade. A evolução temporal da estimativa de efeito dos empregos sobre a acessibilidade (vii) traduz, entretanto, que em 2000 a população de baixa renda estava localizada em áreas com alguma atratividade, o que parece ter se agravado em 2015 diante do processo de periferação para áreas monofuncionais. Essa periferação também explica a queda no efeito parcial da malha viária (v), pois esse processo levou a uma concentração da baixa renda em áreas com pior oferta viária. Por fim, o efeito parcial do transporte público (vi) aumentou, sobretudo para a baixa renda cativa, indicando melhorias na acessibilidade desse grupo, decorrência dos investimentos realizados no período.

## 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

As complexidades envolvidas na problemática das desigualdades na acessibilidade tornam a inferência causal um ferramental de grande atratividade no processo de planejamento integrado, notadamente nos esforços de diagnóstico, que se voltam para a compreensão das explicações dos fenômenos urbanos. Este trabalho buscou trazer contribuições metodológicas para o diagnóstico dessa problemática, através da formalização de método de análise de relações causa-efeito da acessibilidade no território, entre grupos socioeconômicos e ao longo do tempo. O estudo de caso estabelecido em Fortaleza trouxe contribuições na compreensão de como as restrições advindas do uso do solo e dos transportes contribuiu, nas últimas duas décadas, para o agravamento das desigualdades socioespaciais na acessibilidade na cidade.



Com a utilização da modelagem SEM, foi possível confirmar, para Fortaleza, a existência de processos causais distintos entre os estratos sociais ao longo do tempo, bem como controlar o confundimento advindo da similaridade nos padrões de transportes e uso do solo. Os resultados assim obtidos evidenciaram o papel central das restrições de uso do solo na problemática das desigualdades na acessibilidade em Fortaleza, e uma baixa influência da infraestrutura de transportes nos estratos sociais considerados. Entretanto, de forma contraditória, identifica-se um cenário local voltado a intervenções e políticas de transportes, evidenciando a possível ineficiência dessas políticas na mitigação dos problemas de acessibilidade. Vale ressaltar que as políticas habitacionais em Fortaleza, em sua realidade, tenderam a afastar ainda mais a população de baixa renda das centralidades, conduzindo esses grupos para conjuntos habitacionais e empreendimentos do Minha Casa Minha Vida localizados em áreas periféricas.

Apesar das contribuições alcançadas neste trabalho, reconhecem-se limitações na mensuração da acessibilidade das redes de transportes, notadamente na incorporação dos níveis de congestionamento. Além disso, representar o uso do solo como variável latente, trazendo outras oportunidades além dos empregos, permitiria ampliar a compreensão sobre a sua relação com a acessibilidade. Em termos de recomendações, aponta-se que o esforço de diagnóstico dessa problemática incorpore explicações que permitam relacionar as desigualdades socioespaciais da acessibilidade às diferenças na mobilidade entre grupos, sob a ótica das externalidades associadas ao transporte, na segurança viária, no meio ambiente e na qualidade de vida.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrade, B. R.; C. F. G. Loureiro e F. F. L. M. Sousa (2020) Efeitos da Periferização nos Níveis de Acessibilidade aos Empregos da População de Baixa Renda em Fortaleza. *Transportes*, v. 28, n. 3, p. 43–60.
- Anselin, L (2017) *GeoDa: An Introduction to Spatial Data Analysis*. The University of Chicago.
- ABEP - Associação Brasileira de Empresas de Pesquisa (2015) *Critério de Classificação Econômica Brasil, 2015*.
- Bertolini, L.; F. le Clercq e L. Kapoen (2005) 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*, v. 12, n. 3, p. 207–220. doi: 10.1016/j.tranpol.2005.01.006
- Bosetti, S.; A. C. Di Bartolo; P. Malgieri; A. Sitran; H. Bruhova-Foltynova; R. Jordova; P. Kurfust e D. Smutkova (2014) *Policy Recommendations: for EU Sustainable Mobility Concepts Based on CIVITAS Experience*.
- Castro, I. R.; C. F. G. Loureiro; F. F. L. M. Sousa e A. S. Lopes (2021) Evolução da Acessibilidade ao Trabalho da População de Baixa Renda em Fortaleza no Século XXI: Rumo à Urbe Sustentável? *Anais do 35º Congresso de Ensino e Pesquisa em Transportes, ANPET*.
- CBTU – Companhia Brasileira de Transportes Urbanos (1996) *Pesquisa de Demanda por Transportes na Região Metropolitana de Fortaleza*. Programa de Estudos de Transporte em Cidades de Médio Porte.
- Freitas, C. F. S. e L. R. B. Pequeno (2015) Produção Habitacional na Região Metropolitana de Fortaleza na Década de 2000: Avanços e Retrocessos. *Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais*, v.17, n.1, p.45–59.
- Freire, R. M. C.; C.F.G. Loureiro; A. S. Lopes e F. F. L. M. Sousa (2020) Avaliação dos impactos do metrô na acessibilidade da população de baixa renda aos postos de trabalho em Fortaleza, *Transportes*, v.27, n.3, p.144–156.
- Garcia, C. S. H. F., R. Macário, E. D. A. G. Menezes e C. F. G. Loureiro (2018) Strategic Assessment of Lisbon's Accessibility and Mobility Problems from an Equity Perspective. *Networks & Spatial Economics*, v.18, p.415-439.
- Grace, J. B. e K. A. Bollen (2008) Representing General Theoretical Concepts in Structural Equation Models: The Role of Composite Variables. *Environmental and Ecological Statistics*, v. 15, n. 2, p. 191–213.
- Hoyle, R. H. (2012) *Handbook of Structural Equation Modeling*. New York: The Guilford Press.
- Johnson, D.; M. Ercolani e P. Mackie (2017) Econometric Analysis of the Link Between Public Transport Accessibility and Employment. *Transport Policy*, v. 60, p. 1-9. DOI: 10.1016/j.tranpol.2017.08.001
- Lima, L. S.; C. F. G. Loureiro; F. F. L. M. Sousa e A. S. Lopes (2021) Espraiamento Urbano e seus Impactos nas Desigualdades Socioespaciais da Acessibilidade ao Trabalho em Fortaleza. *Transportes*, v.29, n.1, p.229-246.
- Lucas, K. (2012) Transport and Social Exclusion: Where Are We Now? *Transport Policy*, v. 20, p. 105–113.
- Pearl, J. (2000) *Causality: Models, Reasoning, and Inference*, ed. 1, vol. 53, Cambridge University Press, USA.
- Pereira, R. H. M.; C. K. V. Braga; B. Serra e V. G. Nadalin (2019) Desigualdades socioespaciais de acesso a oportunidades nas cidades brasileiras. *Texto para Discussão IPEA*, v. 2535. Brasília, DF.



- Pereira, R. H. M.; Schwanen, T.; e Banister, D. (2017) Distributive justice and equity in transportation. *Transport Reviews*, v. 37, n. 2, p. 170–191. doi: 10.1080/01441647.2016.1257660
- Pinto, D. G. L.; M. F. Siqueira; C. F. G. Loureiro e F. F. L. M. Sousa (2021) Inferência Causal da Evolução dos Padrões de Escolha Modal por Classe de Renda em Fortaleza. *Anais do 35º Congresso de Ensino e Pesquisa em Transportes, ANPET*.
- Rolnik, R. e Nakano, K. (2009) As armadilhas do pacote habitacional. *Le Monde Diplomatique Brasil*.
- Shipley, B. (2016) *Cause and Correlation in Biology*. 2a ed. Cambridge University Press.
- Siqueira, M. F. (2020) *Metodologia de Análise dos Determinantes da Demanda por Transportes no Paradigma da Inferência Causal*. Dissertação. Universidade Federal do Ceará.
- Sousa, F. F. L. M. (2019) *Diagnóstico Estratégico das Desigualdades Socioespaciais na Acessibilidade ao Trabalho em Fortaleza*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Ceará.
- Soares, F. D. P.; C. F. G. Loureiro e E. J. Miller (2018) Diagnosis: A Problem-Oriented Approach to Urban Transportation Planning. *Transportation Research Board*.
- van Wee, B. (2016) Accessible Accessibility Research Challenges. *Journal of Transport Geography*, v.51, p.9-16.
- Villaça, F. (1998) *Espaço Intra-Urbano no Brasil*. Studio Nobel, FAPESP, Lincoln Institute, São Paulo.