



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

FRANCELINO FRANCO LEITE DE MATOS SOUSA

METODOLOGIA DE CALIBRAÇÃO PARA
MODELOS INTEGRADOS DOS TRANSPORTES E USO DO SOLO

FORTALEZA

2016

FRANCELINO FRANCO LEITE DE MATOS SOUSA

METODOLOGIA DE CALIBRAÇÃO PARA
MODELOS INTEGRADOS DOS TRANSPORTES E USO DO SOLO

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

Orientador: Prof. Ph.D. Carlos Felipe Grangeiro Loureiro

FORTALEZA

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

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

S696m Sousa, Francelino Franco Leite de Matos.
Metodologia de calibração para modelos integrados dos transportes e uso do solo / Francelino Franco
Leite de Matos Sousa. – 2016.
127 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2016.
Orientação: Prof. Dr. Carlos Felipe Grangeiro Loureiro.

1. Modelagem Integrada. 2. Método de Calibração. 3. TRANUS. 4. Transportes. 5. Uso do Solo. I. Título.
CDD 388

FRANCELINO FRANCO LEITE DE MATOS SOUSA

METODOLOGIA DE CALIBRAÇÃO PARA
MODELOS INTEGRADOS DOS TRANSPORTES E USO DO SOLO

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

Aprovada em: 08/08/2016

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Ph.D. Carlos Felipe Grangeiro Loureiro, UFC (Orientador)
Doutor pela Universidade do Tennessee System – Knoxville, EUA

Prof. Dr. Bruno Vieira Bertoncini, UFC (Examinador Interno)
Doutor pela Universidade de São Paulo – São Carlos, Brasil

Prof. Dr. Orlando Strambi, USP (Examinador Externo)
Doutor pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – São Paulo, Brasil

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, a Deus.

À minha mãe, meu pai e minha irmã pelo incentivo e apoio durante a realização deste mestrado.

À Ana Carolina Cadore pela paciência em estar ao meu lado mesmo nos momentos mais estressantes, como a semana de entrega deste texto.

Ao Professor Felipe, que me ensinou a ser aluno e pesquisador. Que sempre esteve presente, sem respostas, mas com uma infinidade de caminhos. Que foi muito além do seu papel como orientador e se tornou um conselheiro e amigo. Que nos apresenta diariamente uma forma de aprender completamente diferente, com certeza mais difícil, mas também mais gratificante.

Aos amigos do MITUS, que acompanharam cada etapa deste projeto. Foram eles que estudaram, discutiram e brigaram comigo para esse trabalho se tornar uma base para o que ainda há por vir. Cada um teve um papel importante nestes últimos 2 anos, até mesmo os IC's. E aos demais amigos do PETRAN, que, sem eles, ir para o Pici todo dia não teria a menor graça. E um agradecimento especial ao Victor Macedo e Sued Lacerda, sem os quais eu seria muito menos perturbado, mas eu sei que estão apenas fazendo o papel de irmãos.

Aos amigos de longa data, da época do Batista, que não estiveram presente na defesa, mas que estão presentes na minha vida há muito tempo e que contribuíram para eu ser essa pessoa “mastodôntica”.

A todos os professores do PETRAN, em especial ao Prof. Bruno Bertoncini, ao Prof Francisco Moraes, ao Prof. Flavio Cunto e ao Prof, Manoel Castro, que amam o que fazem e conseguem passar isso a cada um de seus alunos. Que se interessaram e ajudaram na construção deste trabalho. Um abraço especial à Profª Verônica, sem a qual eu provavelmente não teria entrado no PETRAN. E ao Prof. Orlando Strambi, que, apesar de não ser do PETRAN, já era admirado pelo seu corpo docente, agora ganhou o respeito e simpatia dos seus alunos.

À FUNCAP que financiou este projeto.

E à Prefeitura de Fortaleza pelo fornecimento de dados.

“Não extinga sua inspiração e sua imaginação;
não se torne o escravo do seu modelo.”

Vincent van Gogh

RESUMO

O planejamento urbano integrado requer a modelagem das inter e intra-relações entre os subsistemas de atividades, uso do solo e transportes. Diversos modelos integrados foram desenvolvidos nas últimas décadas, o que possibilita identificar a abordagem conceitual e a estrutura de modelagem que se adequa aos propósitos do processo de planejamento e às especificidades do fenômeno urbano em análise. Nesta pesquisa de mestrado, cujo objetivo geral é possibilitar que o esforço de calibração de modelos LUTI promova uma melhor compreensão da problemática foco do planejamento urbano, o pacote computacional TRANUS apresentou-se como uma plataforma adequada de modelagem conceitual e operacional dos indicadores necessários a caracterização e diagnóstico da problemática da acessibilidade e mobilidade urbanas. Dentre os indicadores considerados, embora alguns possam ser representados por variáveis obtidas diretamente em campo, enquanto outros são medidas de desempenho que resultam dos modelos de simulação, há ainda aqueles que podem ser quantificados por meio dos próprios parâmetros de calibração dos respectivos modelos. A modelagem desses indicadores, portanto, exige um esforço considerável de calibração dos parâmetros dos diversos modelos matemáticos e computacionais que compõem o TRANUS, ajustando-os às especificidades da realidade local. O método proposto de calibração teve sua aplicabilidade testada a partir de uma aplicação para a cidade de Fortaleza.

Palavras Chaves: Modelagem Integrada, Método de Calibração, TRANUS, Transportes, Uso do Solo.

ABSTRACT

Integrated urban planning requires the modeling of relation between the activity, land use and transport subsystems. Several integrated models have been developed in recent decades, what allows identifying the conceptual approach and the modeling structure that fits to the purposes of the planning process and to the specificities of the urban phenomenon being analyzed. In this masters research, which the general goal is to develop a calibration methodology for integrated models of transport and land use, the computational package TRANUS presents itself as an appropriate platform for the conceptual and operational modeling for the necessary indicators to the characterization and diagnostic of accessibility and urban mobility. Among the indicators considered, some might be represented by values acquired directly in field, while others are performance measures which results from the simulation models, there are still those which might be quantified by models parameters. Therefore, the modeling of these indicators requires considerable parameters calibration effort of the mathematical and computational models that compose TRANUS, adjusting them to the specificities of the local reality. The proposed method has its applicability tested in Fortaleza City.

Key Words: Integrated modeling, calibration method, TRANUS, Transport, Land Use.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	-	Relações entre os subsistemas de transportes e de atividades	16
Figura 2	-	O ciclo de interação entre o uso do solo e os transportes	18
Figura 3	-	Proposta de modelo ALUTI.....	19
Figura 4	-	Análise dos modelos operacionais LUTI.....	22
Figura 5	-	A dinamicidade entre os subsistemas	27
Figura 6	-	Síntese da análise conceitual dos modelos LUTI	29
Figura 7	-	Relações dinâmicas nos sistemas de uso do solo e de transportes.....	32
Figura 8	-	Utilidades e probabilidades do modelo aninhado	36
Figura 9	-	Desutilidade composta de transportes.....	37
Figura 10	-	Relações entre as atividades.....	41
Figura 11	-	Coefficientes intersetoriais	45
Figura 12	-	A modelagem do subsistema de atividades	46
Figura 13	-	Modelos da demanda por solo – decisão de localização das atividades	49
Figura 14	-	Modelos da demanda por solo – demanda por espaço.....	51
Figura 15	-	A demanda do subsistema de uso do solo.....	53
Figura 16	-	Modelos da oferta do uso do solo	55
Figura 17	-	Modelos da demanda por transportes – quantidade de viagens.....	57
Figura 18	-	Curva de demanda por transportes - função elástica	58
Figura 19	-	Modelos da demanda por transportes – escolha de conjuntos de modos e rotas	60
Figura 20	-	Modelos da oferta de transportes	63
Figura 21	-	Variáveis de interação dos subsistemas	64
Figura 22	-	Representação conceitual do modelo TRANUS.....	66
Figura 23	-	Classificação das variáveis	67
Figura 24	-	Processo de calibração	71
Figura 25	-	Sequência tradicional de calibração do TRANUS.....	73
Figura 26	-	Exemplo de calibração dos coeficientes técnicos	74
Figura 27	-	Modelos de uso do solo.....	75
Figura 28	-	Modelos de transporte.....	79
Figura 29	-	Modelos de interface.....	80
Figura 30	-	Sequência de calibração	82
Figura 31	-	Calibração dos coeficientes técnicos com dados diretos	84

Figura 32 - Demanda elástica	87
Figura 33 - Modelagem dos substitutos.....	87
Figura 34 - Regiões de análise.....	95
Figura 35 - Padrões de ocupação territorial das classes de domicílio	98
Figura 36 - Tipos de coeficientes técnicos para Fortaleza.....	99
Figura 37 - Calibração dos coeficientes técnicos do tipo 3 em Fortaleza	100
Figura 38 - Calibração dos coeficientes técnicos do tipo 4 em Fortaleza	102
Figura 39 - Coeficientes técnicos que envolvem o setor Educacional	102
Figura 40 - Representação dos coeficientes intersetoriais que envolvem o Setor I.....	104
Figura 41 - Distribuição de atividades das relações que envolvem o setor populacional de maior renda	105
Figura 42 - Índices de aproveitamento para classificação dos setores	106
Figura 43 - Demanda elástica de solo para o Setor B.....	107
Figura 44 - Decisão de substitutos para o Setor B.....	107
Figura 45 - Médias e desvios padrões dos preços sombras de setores não transportáveis	108
Figura 46 - Médias e desvios padrões dos preços sombras de setores transportáveis.....	108
Figura 47 - Preços sombra dos setores não transportáveis	109
Figura 48 - Fluxos econômicos.....	110
Figura 49 - Distribuições horárias de viagens	112
Figura 50 - Demanda elástica por viagens.....	115
Figura 51 - Tempo médio de deslocamento por categoria de viagem (em minutos)	117
Figura 52 - Tempo médio de deslocamento por categoria de viagem e por modo (em minutos)	118
Figura 53 - Tempo total de deslocamento por categoria de viagem e por modo (em minutos)	119
Figura 54 - Tempo médio de deslocamento das viagens com origem nas zonas e que utilizam modos motorizados	120
Figura 55 - Demanda reprimida por categoria de transporte	120
Figura 56 - Acessibilidade dos setores populacionais	121
Figura 57 - Acessibilidade do setor populacional de renda mais baixa por modo de transporte.....	122

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	-	Nível de agregação dos elementos das decisões	24
Tabela 2	-	Características da dinamicidade dos modelos operacionais LUTI	28
Tabela 3	-	Fluxos econômicos inter-regionais	42
Tabela 4	-	Fluxos econômicos sem elementos espaciais	43
Tabela 5	-	Fluxos econômicos sem relações entre setores	43
Tabela 6	-	Parâmetros e indicadores dos modelos de transporte	89
Tabela 7	-	Bases de dados utilizadas para a calibração.....	96
Tabela 8	-	Sentido principal das viagens na hora de pico da manhã por setor econômico	111
Tabela 9	-	Categorias de transportes	113
Tabela 10	-	Indicadores da calibração dos modelos de transportes	114
Tabela 11	-	Parâmetros dos modelos de geração de viagens	115
Tabela 12	-	Parâmetros dos modelos de divisão modal / alocação	116

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	MODELAGEM INTEGRADA DOS TRANSPORTES E USO DO SOLO.....	15
2.1	Representação conceitual do fenômeno.....	15
<i>2.1.1</i>	<i>Cascetta (2009).....</i>	<i>15</i>
<i>2.1.2</i>	<i>Wegener (1995).....</i>	<i>17</i>
<i>2.1.3</i>	<i>Lopes (2015).....</i>	<i>18</i>
2.2	Classificação e análise dos modelos operacionais LUTI	20
<i>2.2.1</i>	<i>Representação do fenômeno.....</i>	<i>22</i>
<i>2.2.2</i>	<i>Nível de agregação.....</i>	<i>23</i>
<i>2.2.3</i>	<i>Aleatoriedade do processo decisório</i>	<i>25</i>
<i>2.2.4</i>	<i>Dinamicidade das decisões</i>	<i>25</i>
2.3	Considerações finais	28
3	MODELAGEM INTEGRADA NO TRANUS.....	31
3.1	Modelagem das inter-relações entre os subsistemas.....	32
<i>3.1.1</i>	<i>Medida de impacto dos transportes</i>	<i>33</i>
<i>3.1.2</i>	<i>Medida de impacto do uso do solo e das atividades.....</i>	<i>38</i>
3.2	Modelagem do subsistema de atividades	43
3.3	Modelagem do subsistema de uso de solo	47
<i>3.3.1</i>	<i>Modelos de demanda</i>	<i>47</i>
<i>3.3.2</i>	<i>Modelos de oferta.....</i>	<i>54</i>
3.4	Modelagem do subsistema de transportes	56
<i>3.4.1</i>	<i>Modelos de demanda</i>	<i>56</i>
<i>3.4.2</i>	<i>Modelos de oferta.....</i>	<i>62</i>
3.5	Modelo de interface	64
3.6	Considerações finais	66
4	PROPOSTA METODOLÓGICA DE CALIBRAÇÃO DO TRANUS.....	68
4.1	Calibração convencional	68
<i>4.1.1</i>	<i>Organização das bases de dados</i>	<i>69</i>
<i>4.1.2</i>	<i>Sequência de calibração</i>	<i>70</i>
<i>4.1.3</i>	<i>Modelo de atividades.....</i>	<i>73</i>
<i>4.1.4</i>	<i>Modelos de uso do solo</i>	<i>74</i>
<i>4.1.5</i>	<i>Modelos de transportes</i>	<i>78</i>

4.1.6	<i>Modelo da interface</i>	80
4.2	Proposta metodológica	81
4.2.1	<i>Sequência de calibração</i>	82
4.2.2	<i>Parâmetros de interesse</i>	83
4.2.3	<i>Modelo de atividades</i>	84
4.2.4	<i>Modelos de uso do solo</i>	86
4.2.5	<i>Modelos de transporte</i>	89
4.2.6	<i>Organização das bases de dados</i>	92
4.3	Considerações finais	93
5	CALIBRAÇÃO DO TRANUS PARA FORTALEZA	94
5.1	Organização das bases de dados	95
5.2	Modelo de atividades	97
5.2.1	<i>Calibração</i>	97
5.2.2	<i>Medida de desempenho: coeficientes intersetoriais</i>	103
5.2.3	<i>Medida de impacto: fluxos econômicos</i>	104
5.3	Modelos de uso do solo	105
5.3.1	<i>Calibração</i>	105
5.3.2	<i>Medida de desempenho: preço sombra</i>	108
5.3.3	<i>Medida de impacto: fluxos econômicos</i>	110
5.4	Modelo de interface	111
5.5	Modelos de transportes	113
5.5.1	<i>Calibração</i>	113
5.5.2	<i>Medida de desempenho: custo generalizado</i>	117
5.5.3	<i>Medida de impacto: custo composto</i>	121
5.6	Considerações finais	123
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	124
6.1	Conclusões	124
6.2	Recomendações de trabalhos futuros	126
	REFERÊNCIAS	128

1 INTRODUÇÃO

O planejamento dos transportes urbanos tem evoluído de uma abordagem tradicional, focada exclusivamente nas relações entre demanda e oferta do sistema de transportes, para um processo integrado envolvendo também as inter-relações com os sistemas de atividades e de uso do solo (Meyer e Miller, 2001). Essa mudança de paradigma assume que as intervenções nos transportes influenciam os padrões de desenvolvimento urbano, da mesma forma que a localização de moradias e empregos influenciam os padrões de viagens (Waddell, 2011). Para analisar as relações complexas entre esses três subsistemas urbanos, existe a necessidade de que o modelo de simulação computacional utilizado no processo de planejamento também seja integrado (Southworth, 1995). Este tipo de ferramenta analítica é conhecido na literatura como modelos de interação dos transportes e uso do solo, do inglês *Land Use Transport Interaction (LUTI) models*.

O ferramental de modelagem matemática, estatística e computacional tem sido um instrumento reconhecidamente importante de previsão de impactos futuros na avaliação de alternativas de intervenção, com os modelos LUTI não fugindo a essa abordagem. Entretanto, eles podem desempenhar outras relevantes funções no processo de planejamento urbano integrado, sendo utilizados como “plataformas” para auxiliar os atores envolvidos a acessar informações e negociar seus conflitos de interesse, funcionando dessa forma como ferramentas de aprendizado (Pereira e Quintana, 2002) nas fases estratégicas do planejamento (Brömmelstroet e Bertolini, 2011), permitindo melhor caracterizar e diagnosticar problemas de acessibilidade e mobilidade urbanas (Soares, 2014) por meio de uma análise interpretativa dos parâmetros calibrados e indicadores simulados (Gudmundsson, 2011).

Apesar da nomenclatura, esses modelos usualmente também consideram o subsistema de atividades mesmo que de forma implícita. Lopes (2015) descreve o sistema urbano como composto por: as atividades, representando os desejos e as necessidades das pessoas e empresas; o uso do solo, responsável por representar a localização e a distribuição espacial das atividades sobre o território; e os transportes, responsáveis pela movimentação de pessoas e bens sobre o espaço.

Em uma revisão dos principais modelos conceituais e operacionais LUTI desenvolvidos nas últimas décadas, Lopes (2015) avaliou conceitualmente a capacidade desses modelos de representarem as relações internas de cada subsistema, assim como as interações entre eles. Com tantas ferramentas distintas já propostas e desenvolvidas pela comunidade científica internacional, advém a primeira questão de pesquisa desta dissertação: dentre os modelos

operacionais LUTI disponíveis, quais os que conseguem integrar satisfatoriamente as análises das interações entre os componentes dos subsistemas de atividades, uso do solo e transportes? Como primeiro passo para responder essa questão, Lopes (2015) propôs um modelo conceitual do fenômeno urbano, detalhando como ocorrem as intra e inter-relações desses três subsistemas e propondo variáveis que permitem representar essas interações. Apesar dos modelos serem simplificações da realidade, espera-se que as modelagens integradas sejam capazes de se adequarem à representação do fenômeno. Portanto, no trato dessa questão de pesquisa, o método proposto deve ser capaz de avaliar se as variáveis modeladas estão consistentemente conectadas e têm significados coerentes com aqueles apontados na representação do fenômeno. A partir disso, surge a segunda questão de pesquisa: como são modeladas as intra e inter-relações dos subsistemas urbanos?

A investigação de como os esforços de modelagem representam analiticamente os subsistemas permite também compreender o nível de detalhamento ao qual elas se propõem. Quanto mais detalhado, mais complexo será o processo de calibração de um modelo. Em geral, as simulações das interações dos subsistemas, assim como da representação de cada um deles, tornam a atividade de calibração dos modelos LUTI uma tarefa bastante complexa (Miller, 2003). Para calibrar um modelo é preciso identificar, dentre as variáveis modeladas, aquelas que são parâmetros a serem ajustados para a realidade local, já que algumas são variáveis de entrada observadas diretamente em campo, enquanto outras são medidas de desempenho que resultarão da modelagem. Dessa forma, surgem mais duas questões de interesse nesta pesquisa: quais os parâmetros a serem calibrados na modelagem integrada e quais desses parâmetros podem representar indicadores úteis na caracterização e diagnóstico da problemática em foco?

Para realizar a calibração dos parâmetros de um modelo existem na literatura basicamente dois tipos de métodos distintos: o primeiro é a calibração manual (Feudo, 2014); o segundo é a aplicação direta da otimização (Capelle, Sturm e Vidard, 2015; Dutta *et al.*, 2014). Contudo, aplicar unicamente a otimização é desprezar a capacidade dos modelos matemáticos de viabilizarem o entendimento sobre o comportamento do fenômeno (Ortúzar e Willumsen, 2011). Entretanto, calibrar manualmente é uma tarefa cansativa que pode incorrer em erros (Dutta *et al.*, 2014). Sendo assim, surge uma quarta questão a ser tratada nesta pesquisa: qual a maneira mais adequada de se calibrar um modelo LUTI?

Neste contexto, o objetivo geral desse trabalho é possibilitar que o esforço de calibração de modelos LUTI promova uma melhor compreensão da problemática foco do planejamento urbano, a partir da consecução dos seguintes objetivos específicos:

- Selecionar uma plataforma de modelagem operacional LUTI capaz de representar adequadamente as intra e inter-relações dos subsistemas de transportes, uso do solo e atividades;
- Analisar os modelos matemáticos e de simulação computacional incorporados na plataforma LUTI selecionada, identificando seus parâmetros que podem representar indicadores úteis na caracterização e diagnóstico da problemática em foco e as limitações de representação do fenômeno inerentes aos modelos;
- Desenvolver uma proposta metodológica de calibração dos parâmetros identificados como potenciais indicadores, contribuindo para as análises de alternativas de intervenção que compõem o processo de planejamento urbano integrado;
- Demonstrar a aplicabilidade do método de calibração proposto, a partir de um estudo de caso da cidade de Fortaleza.

A estrutura deste trabalho foi planejada para contemplar os objetivos específicos estabelecidos. No Capítulo 2, discorre-se sobre as relações entre os subsistemas que os modelos LUTI devem ser capazes de simular, e avalia-se quais modelos são considerados mais adequados para representar o fenômeno urbano, atendendo assim ao primeiro objetivo específico desta pesquisa. O Capítulo 3 analisa os modelos matemáticos e computacionais do modelo integrado selecionado, cumprindo com o segundo objetivo específico. Já o terceiro objetivo específico será objeto de discussão no Capítulo 4 e a aplicação do método desenvolvido para a cidade de Fortaleza é objeto do Capítulo 5. O Capítulo 6 apresenta as conclusões e recomendações deste trabalho.

2 MODELAGEM INTEGRADA DOS TRANSPORTES E USO DO SOLO

Este capítulo trata do primeiro objetivo específico: selecionar uma plataforma de modelagem operacional LUTI capaz de representar adequadamente as intra e inter-relações dos subsistemas de transportes, uso do solo e atividades. Busca-se alcançar esse objetivo por meio inicialmente de uma discussão conceitual sobre qual fenômeno se deseja modelar (seção 2.1), seguida por um esforço de classificação e análise das premissas e características dos principais modelos operacionais LUTI (seção 2.2), para só então escolher uma plataforma considerada adequada (seção 2.3).

2.1 Representação conceitual do fenômeno urbano

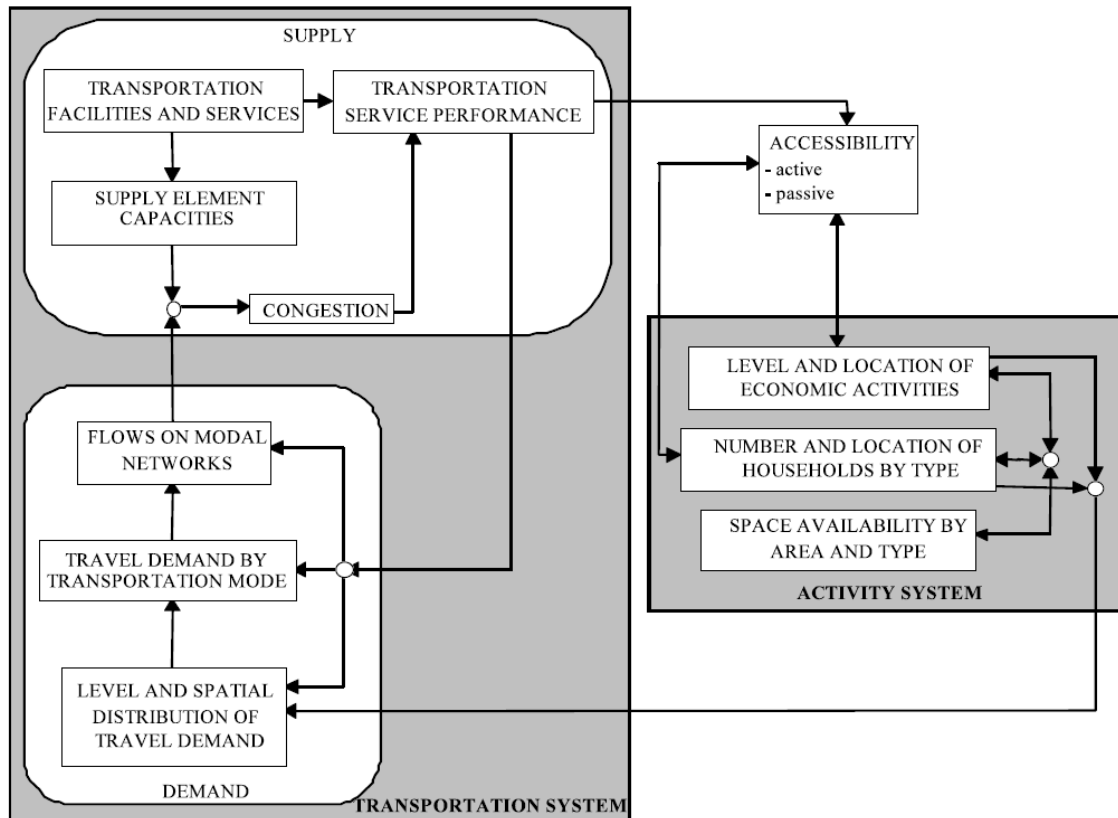
Uma ferramenta computacional que dê suporte ao longo de todo o processo de planejamento integrado dos transportes com o uso do solo, que sirva de plataforma de discussão e negociação entre os diversos atores ao fornecer indicadores da problemática em análise, e que apoie os tomadores de decisão na avaliação de cenários de intervenção, deve ser capaz de simular adequadamente os subsistemas urbanos e suas inter-relações (Brömmelstroet *et al.*, 2013). Para avaliar a capacidade dos modelos LUTI em representar esses subsistemas, discute-se inicialmente três abordagens conceituais de representação do fenômeno, apresentadas em ordem crescente de complexidade, identificando suas contribuições e respectivas limitações, de modo a melhor compreender a estrutura funcional e o processo evolutivo no desenvolvimento dos modelos operacionais LUTI.

2.1.1 Cascetta (2009)

A representação conceitual de Cascetta (2009), apresentada na Figura 1, contempla apenas dois subsistemas: o de transportes e o de atividades. O subsistema de transportes, foco principal do modelo conceitual, é representado a partir dos conceitos de demanda e oferta, os quais são dependentes entre si e geram o que é chamado de performance do serviço, sendo quantificada por medidas de acessibilidade. O subsistema de atividades (equivalente ao de uso do solo, segundo o próprio autor) é caracterizado pelas decisões locacionais dos domicílios e das atividades econômicas, as quais são impactadas pelo solo disponível. O impacto dos transportes sobre as atividades ocorre através da acessibilidade. Na relação inversa, as

atividades impactam os transportes por meio do nível e da distribuição espacial da demanda por viagens.

Figura 1 - Relações entre os subsistemas de transportes e de atividades



Fonte: Cascetta (2009).

No que concerne ao subsistema de transportes, essa representação conceitual permite compreender detalhadamente o seu processo decisório e como o padrão resultante de deslocamentos pode impactar no subsistema de atividades/uso do solo. Dessa forma, esse modelo conceitual é útil para a compreensão não só das relações internas entre demanda e oferta do subsistema de transportes, mas também da sua inter-relação com os demais subsistemas, servindo como base para o desenvolvimento e análise crítica dos modelos operacionais de transportes.

Entretanto, a sua representação do subsistema de atividades/uso do solo deixa as seguintes questões em aberto: Como se dão as relações de demanda e oferta de atividades/uso do solo? Que aspectos diferenciam decisões inerentes ao nível de intensidade e à localização das atividades econômicas, assim como dos domicílios de distintos segmentos socioeconômicos da população? Qual o efeito da acessibilidade sobre os mecanismos de mercado que regem a disponibilidade de espaço? Como representar essa disponibilidade como uma restrição imposta

pelo estado de desequilíbrio interno do subsistema de atividades/uso do solo? Qual a medida de impacto desse subsistema sobre os transportes? Para a interpretação de modelos de atividades/uso do solo, a representação do autor auxilia a identificar decisões importantes que devem ser modeladas, como quantidades e localizações de domicílios e de atividades; porém, o baixo nível de detalhamento das suas intrarrelações, assim como da sua inter-relação com o sistema de transportes, limita a interpretação da estrutura de funcionamento dos modelos LUTI.

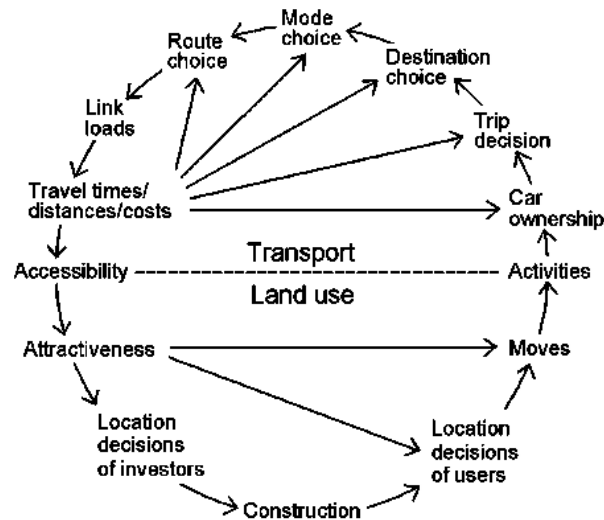
2.1.2 Wegener (1995)

O modelo conceitual LUTI (Figura 2) proposto por Wegener (1995), apesar de bem anterior ao de Cascetta (2009), representa com maior nível de detalhamento as intrarrelações em cada subsistema, apontando as atividades como ponte entre o uso do solo e os transportes, ou seja, destacando que a necessidade de realizar atividades espacialmente distribuídas, como morar, trabalhar e comprar, é a responsável por gerar as viagens. Internamente, o subsistema de transportes pode ser entendido como uma sequência de decisões, influenciadas pelos custos, tempos e distâncias de viagens. A sistematização desse subsistema ocorre em termos de demanda: da “posse de automóvel” até “escolha de rotas”; e de oferta: começando por “carregamento nos links” e indo até “tempos, distâncias e custos de viagens”, que seriam o resultado do desequilíbrio entre demanda e oferta e também o indicador para o conceito de acessibilidade. Já o subsistema de uso do solo retrata a demanda pelo solo por meio da “decisão de localização dos usuários”, aqui entendidos como residentes e empreendedores, e também sua oferta através da “decisão de localização dos investidores” que produzem o espaço construído. O impacto dos transportes no uso do solo é dado pela “acessibilidade”; enquanto a distribuição espacial das atividades é responsável por originar a demanda por viagens.

Falta ao modelo um indicador do nível de serviço do subsistema de uso do solo, resultado da interação entre sua demanda e oferta, o que evidencia a incapacidade do modelo em expressar a relação entre esses dois componentes, diferentemente de como ocorre na sua porção relativa aos transportes. Além disso, as “atividades” são colocadas como uma medida de interação entre uso do solo e transportes, análoga à “acessibilidade”, como se o uso do solo gerasse as atividades. Dessa forma, não existe o impacto direto dos transportes sobre as atividades, como propôs Cascetta (2009), com o impacto do uso do solo sobre as atividades se dando pela distribuição dos usos, excluindo assim a acessibilidade. Quando comparado com o modelo anterior, não agrega muitas informações para a representação conceitual do subsistema de transportes; entretanto, a sistematização do subsistema de uso do solo, e sua evidente

separação das atividades, permite a identificação das decisões relevantes ao uso do solo e que precisam estar incorporadas nos modelos LUTI.

Figura 2 - O ciclo de interação entre o uso do solo e os transportes



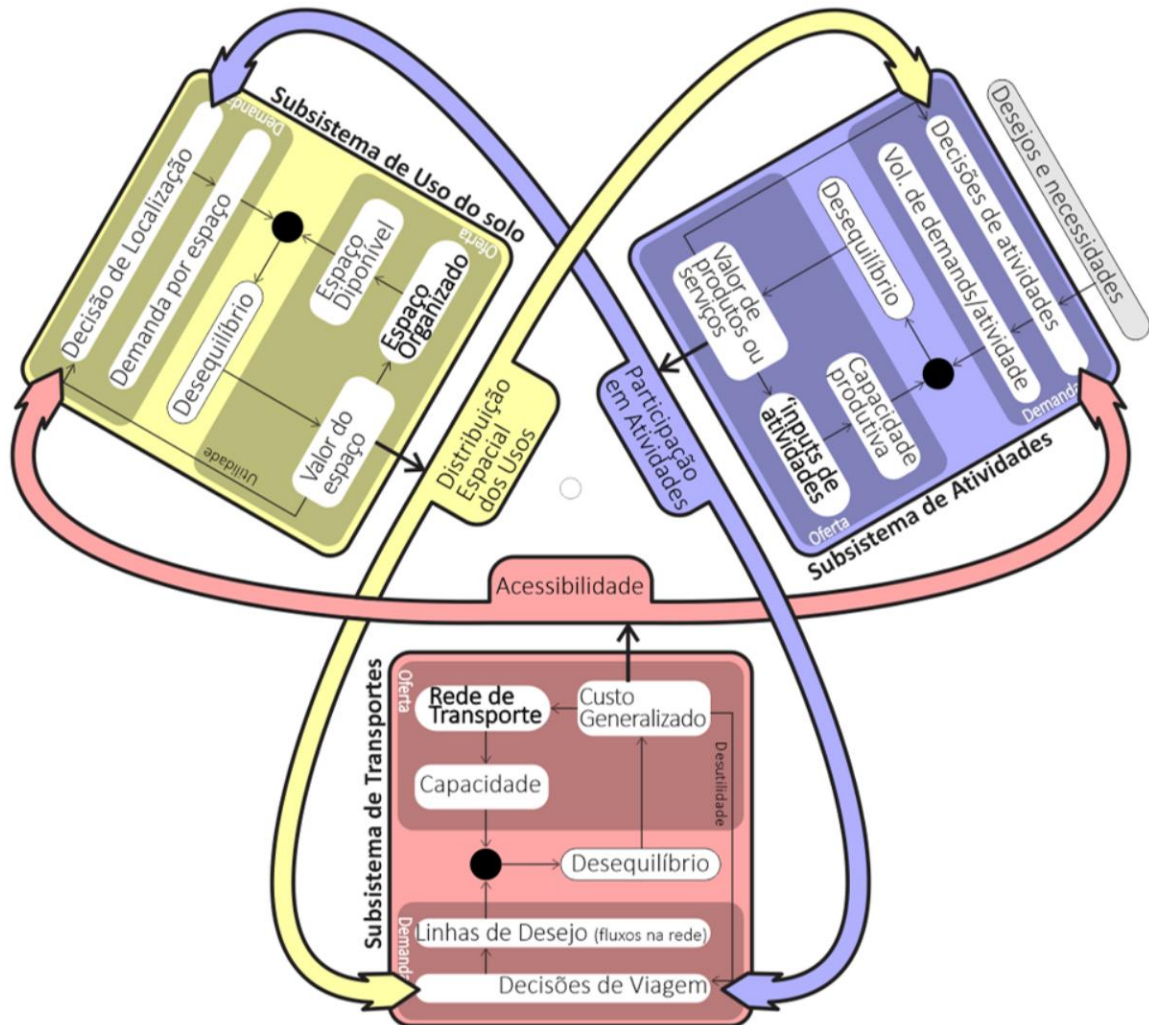
Fonte: Wegener (1995).

2.1.3 Lopes (2015)

Lopes (2015), por sua vez, representa o fenômeno urbano dividido em três subsistemas: transportes, uso do solo e atividades, como pode ser observado na Figura 3. Cada um deles interage diretamente com os demais, sendo internamente representados como relações de demanda e oferta. Existe ainda um quarto componente nessa representação, denominado de “desejos e necessidades”, que tem sua origem em características sociais, econômicas e culturais, sendo responsável por gerar a demanda pelas atividades. Nos transportes, a demanda é por viagens; a oferta é da rede de transportes e suas capacidades; e o indicador da relação entre eles é o custo generalizado de deslocamento, que impacta na própria demanda. No uso do solo, a demanda é limitada pela oferta de espaço disponível e também por seu valor, resultado da interação entre os dois componentes. Por fim, a demanda por atividades é regulada pela capacidade produtiva e pelo valor (não necessariamente monetário) de produtos e serviços, sendo esse o indicador do nível de serviço deste subsistema. O subsistema de transportes impacta nas decisões dos demais a partir das dificuldades impostas pelos deslocamentos, ou seja, por sua resultante de acessibilidade; já o subsistema de uso do solo impacta através da espacialização dos usos; enquanto o subsistema de atividades impacta por meio das restrições

socioeconômicas impostas à participação em atividades, mas que ainda não tiveram sua localização definida.

Figura 3 - Proposta de modelo ALUTI



Fonte: Lopes (2015).

Lopes (2015) reconhece as limitações de sua representação no que concerne à cronologia das relações de dependência entre os subsistemas, pois os ciclos do modelo podem inadequadamente sugerir equilíbrio. Entretanto, a consequência de cada ação acontece em um período de tempo distinto ao da própria ação. Para amenizar esse problema, o funcionamento é proposto em forma de uma helicoidal tripla, em que cada subsistema possui seu próprio ciclo, através das hélices internas, e impactam os demais por meio das hélices externas. Entretanto, essa representação possui suas deficiências, já que cada subsistema possui períodos distintos de ciclo e não ficam evidentes as ações externas que podem ocorrer e vir a interferir nessa cadeia dinâmica de relações.

A sistematização conceitual proposta pelo autor incorpora pontos positivos das duas representações analisadas anteriormente, acrescentando uma representação mais detalhada dos transportes e do uso do solo, destacando ainda a diferenciação entre as decisões locacionais de uso do solo e as decisões de realização das atividades. O modelo ALUTI de Lopes (2015) contribui também com uma representação interna do funcionamento do subsistema de atividades, defendendo a concepção de que os subsistemas de uso do solo e de atividades podem funcionar com base em demanda e oferta, assim como nos transportes; além de explicitar as inter-relações entre os três subsistemas. Esses fatores combinados nos possibilitam uma análise mais aprofundada dos modelos operacionais LUTI.

2.2 Classificação e análise dos modelos operacionais LUTI

Considerando a discussão conceitual acima sobre como melhor representar as intra e inter-relações entre três dos subsistemas que compõem o complexo fenômeno urbano, partiu-se para avaliar se os modelos operacionais LUTI disponíveis atualmente são capazes de representar adequadamente essas relações, empreendendo-se um esforço de classificação e análise das suas premissas e características funcionais. Com esse propósito, primeiramente foram analisados oito trabalhos de revisão de literatura, em ordem cronológica: Southworth (1995) comparou 17 aplicações de modelos, publicadas entre 1985 e 1995, com o intuito de demonstrar sua evolução teórica; Waddell (2002) discutiu as vantagens e desvantagens do URBANSIM, comparando-o com outros quatro modelos; Timmermans (2003) dividiu 22 modelos em três grupos a partir da teoria em que se enquadram; Wegener (2004) comparou 20 modelos sob nove aspectos distintos, como compreensão, estrutura geral e fundamentação teórica; Hunt, Kriger e Miller (2005) realizaram uma revisão detalhada de seis modelos LUTI, com foco nas representações dos subsistemas físicos, nos tomadores de decisão e nos processos modelados; Iacono, Levinson e El-Geneidy (2008) revisaram 18 modelos para avaliar a evolução da teoria de representação da complexidade das relações entre os subsistemas urbanos; Lopes (2015) comparou 10 modelos operacionais LUTI com o propósito de identificar como ocorrem as interações entre os subsistemas urbanos; por fim, Acheampong e Silva (2015) apresentaram uma evolução teórica dos modelos LUTI, avaliando as dificuldades de cada abordagem e como elas foram superadas.

Como síntese das distintas classificações propostas nessas revisões, foi considerada a existência de três grupos principais de modelos operacionais LUTI: a) modelos baseados em

interação espacial; b) modelos com abordagem econométrica; e c) modelos de microssimulação. Os modelos de interação espacial são adaptações do modelo gravitacional de Newton e têm sua origem no modelo Metropolis, proposto por Lowry (1964), pioneiro da modelagem integrada LUTI (Batty, 1994; Wegener, Gnad e Vannahme, 1986). Para esses modelos, a interação entre quaisquer duas zonas é diretamente proporcional ao número de atividades e inversamente proporcional a uma função de fricção entre (Acheampong e Silva, 2015). Já os modelos com abordagens econométricas preveem escolhas como uma função de atributos das alternativas, sendo alguns deles observáveis e outros não. Esse segundo tipo de atributo é o que confere uma dispersão estocástica a esses modelos (Domencich e McFadden, 1975). Por fim, os modelos microscópicos, que são postos como o futuro dos modelos integrados (Iacono, Levinson e El-Geneidy, 2008; Timmermans e Arentze, 2011; Wegener, 2004), possuem o propósito de simular o comportamento decisório no nível dos atores, como pessoas, firmas ou veículos, que evoluem e interagem ao longo do tempo (Miller, 2003).

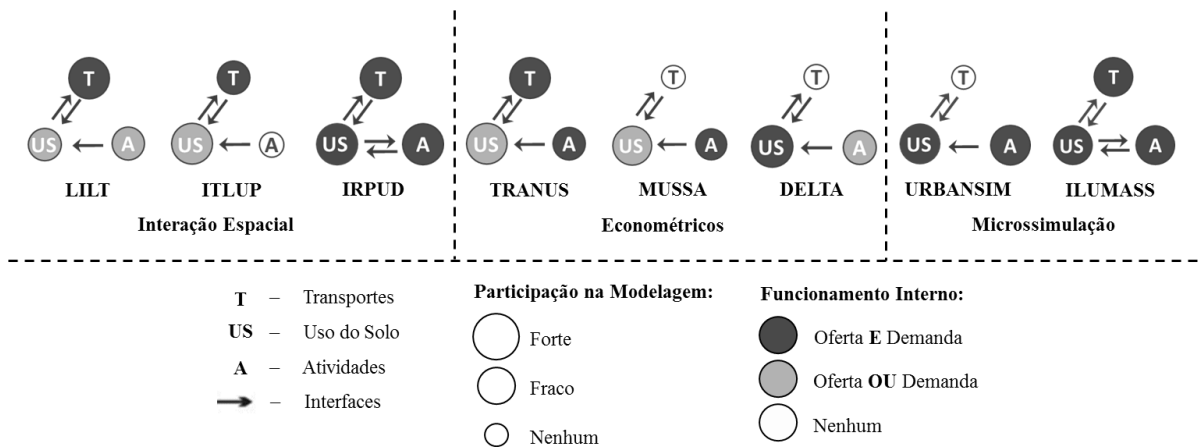
Ao observar o desenvolvimento dos modelos integrados ao longo das últimas cinco décadas, constatam-se avanços no detalhamento das decisões que fazem parte do fenômeno urbano, por exemplo, tornando-os mais desagregados, introduzindo aspectos probabilísticos, ou ainda melhorando a representação da relação entre decisões de diferentes subsistemas. Tais elementos impactam fortemente na operacionalidade e aplicabilidade dos modelos LUTI, se constituindo em aspectos essenciais na diferenciação das suas abordagens teóricas e metodológicas. Dessa forma, além da verificação das decisões incorporadas em cada modelo LUTI avaliado, serão adicionadas como critérios, no método de análise aqui proposto, três outras características dos modelos operacionais: i) nível de agregação das decisões; ii) aleatoriedade do processo decisório; iii) dinamicidade das decisões.

Em cada um dos três grupos da classificação adotada, foram selecionados pelo menos dois modelos operacionais LUTI para serem analisados. Essa seleção considerou: a) literatura existente capaz de subsidiar as análises das suas características; b) presença nos artigos de revisão acima citados; c) concepções distintas de modelos que os diferenciem dos demais. Com base nesses aspectos foram selecionadas as plataformas: LILT (Mackett, 1983), ITLUP (Putman, 1991) e IRPUD (Wegener, 2011a), para representar os modelos baseados em interação espacial; TRANUS (Barra, 1989), MUSSA (Martínez, 1996) e DELTA (Simmonds, 1999) como exemplos dos modelos que possuem abordagens econométricas; e as plataformas URBANSIM (Waddell, 2002) e ILUMASS (Moeckel *et al.*, 2007), como representantes dos modelos de microssimulação.

2.2.1 Representação do fenômeno

Na seção 2.1, foram analisadas três diferentes abordagens conceituais que exploram as relações entre os subsistemas urbanos. Essa discussão subsidiou a identificação acima de importantes características dos modelos; entretanto, a própria modelagem do fenômeno de maneira integral deve também ser um tópico de análise dos modelos operacionais LUTI. Lopes (2015) realizou essa análise sobre três aspectos: a) subsistemas modelados; b) interação entre os subsistemas; c) funcionamento interno de cada subsistema. Essa revisão está sintetizada na Figura 4.

Figura 4 - Análise dos modelos operacionais LUTI



Fonte: Adaptado de Lopes (2015).

Constata-se que o subsistema de uso do solo possui participação ativa na modelagem LUTI, maior do que o subsistema de transportes; e ambos com mais intensidade que o subsistema de atividades. Isso acontece porque mesmo modelos que não simulam as decisões de viagens, ainda são considerados LUTI, como é o caso do MUSSA, DELTA e URBANSIM. Apesar do uso do solo estar presente em todos os modelos, metade deles ignora a modelagem da oferta de solo, por exemplo, as decisões que envolvem os produtores do espaço construído (empresas construtoras, autoconstruções de pessoas de baixa renda, além do próprio poder público). Já no que diz respeito às decisões do subsistema de atividades, em especial aquelas que influem na quantidade de pessoas e empregos em toda a área de estudo, estas precisam ser melhor desenvolvidas na maior parte dos modelos. No ITLUP, essas quantidades precisam ser fornecidas de forma externa. No LILT e DELTA, apenas a quantidade de pessoas é internamente modelada, enquanto a quantidade de empregos é considerada uma variável

exógena. No TRANUS e no MUSSA os modelos são limitados, pois se utilizam apenas de taxas entre empregos e pessoas. No IRPUD, URBANSIM e ILUMASS são utilizados modelos mais robustos, que preveem a evolução de pessoas e empregos a partir do envelhecimento da população e do crescimento ou declínio das atividades empregatícias.

Quanto às interações entre os subsistemas, apenas o IRPUD e o ILUMASS consideram que os totais de pessoas ou empregos (decisões do subsistema de atividades) podem se alterar a depender de decisões do subsistema de uso do solo; por exemplo, a localização espacial dessas atividades. Em todos os modelos, as decisões do uso do solo são dependentes das decisões de transportes e das atividades, assim como as decisões de transportes são modeladas a partir do que ocorre no uso do solo; mas nenhum deles reconhece as relações entre as decisões de transportes e de atividades diretamente.

2.2.2 *Nível de agregação*

É inquestionável a tendência evolutiva dos modelos operacionais LUTI para modelos microscópicos, ou mais desagregados (Wegener, 2011b); apesar dos modelos disponíveis ainda serem agregados, na sua imensa maioria (Miller, 2003). Vale ressaltar que, mesmo em um modelo considerado micro é inevitável que exista algum nível de agregação (Miller, 2003). A desagregação pode ocorrer através de pelo menos três diferentes aspectos: menores unidades de análise espacial; períodos de tempo mais curtos; nível mais detalhado de modelagem da decisão. Este último pode se dar pela maior quantidade de atributos considerados nas decisões, ou ampliando a quantidade de tomadores de decisões. Nesta revisão, os aspectos da agregação adotados para a análise foram o espaço e o nível das decisões, uma vez que a agregação do tempo é relacionada com a dinamicidade dos modelos e será discutida na seção 2.2.4.

Espacialmente, os modelos que permitem uma maior quantidade de zonas e um menor tamanho delas são considerados menos agregados. Dessa forma, os modelos de interação espacial e os econométricos são, em sua maioria, considerados altamente agregados (Iacono, Levinson e El-Geneidy, 2008). Entre os oito modelos avaliados, três se diferenciam: o IRPUD e o ILUMASS que consideram diferentes níveis de detalhamento espacial; e o URBANSIM que é apresentado como um dos modelos com o menor nível de agregação, seja utilizando *grid cells* (Timmermans, 2003) ou domicílios (Waddell, 2002) como unidades de agregação espacial. Para avaliar o nível de agregação das decisões foram utilizadas informações de como são representados os moradores, as atividades produtivas, o solo e as viagens, que são quatro elementos fundamentais dos modelos LUTI, observados anteriormente nas representações

conceituais. A Tabela 1 apresenta um resumo de como as entidades são subdivididas em cada modelo. A representação mais comum dos moradores da área de estudo são subdivisões de domicílios, enquanto as atividades produtivas são mais desagregadas pelos tipos de empregos. Para o solo, ainda existem modelos que o tratam como uma única entidade, subdividindo-o apenas em unidades espaciais, enquanto outros o subdividem em usos pré-definidos. As viagens são desagregadas sempre em função dos tipos (motivo, classe de renda, entre outros) e os modos dessas viagens, diferenciando-se apenas na quantidade possível dessas subdivisões. O TRANUS difere dos demais por dar liberdade ao usuário para indicar como cada entidade deve ser representada e também a quantidade de subdivisões que existirão.

Tabela 1 - Nível de agregação dos elementos das decisões

MODELOS LUTI	MORADORES	ATIVIDADES PRODUTIVAS	SOLO	VIAGENS
LILT Mackett (1983)	Baseado em 4 tipos de Trabalhadores	Baseado em 12 tipos de Empregos	Não existe subdivisão	2 Tipos de Viagens e 3 Modos
ITLUP Putman (1991)	Baseado em Domicílios, tipicamente com 4 tipos	Baseado em Empregos, tipicamente entre 3 a 5 tipos	Subdivide em 8 tipos	3 Tipos de Viagens e 2 ou 3 Modos
IRPUD Wegener (2011)	Baseado em até 30 tipos de Domicílios	Baseado em 8 tipos de Empregos, em função da pessoa empregada	Permite a divisão, mas já apresenta as classes domiciliar, educacional e de saúde.	4 Tipos de Viagens por Renda e 3 Modos
TRANUS Barra (1989)	Permite a divisão, mas sem quantidade e sem unidade pré-definida	Permite a divisão, mas sem quantidade e sem unidade pré-definida	Permite a divisão, mas sem quantidade pré-definida	Sem tipo ou quantidade de subdivisões pré-definida
MUSSA Martínez (1996)	Baseado em até 65 tipos de Domicílios	Baseado em 5 tipos de Empresas	Subdivide em 6 tipos de construções	*
DELTA Simmonds (1999)	Baseado em tipos de Domicílios, mas sem quantidade pré-definida	<i>(Não Identificado)</i>	Não existe subdivisão	*
URBANSIM Waddell (2002)	Baseado em tipos de Domicílios, mas sem quantidade pré-definida	Baseado em Empregos, tipicamente entre 10 e 20 tipos	Subdivide em 25 tipos	*
ILUMASS, Moeckel <i>et al</i> (2007)	Baseado em Pessoas, mas sem quantidade pré-definida	Baseado em Empregos, sem quantidade pré-definida	Permite a divisão, mas sem quantidade pré-definida	<i>(Não Identificado)</i>

*: Não modela o Subsistema de Transportes

Fonte: Elaborado pelo autor.

A representação mais comum dos moradores da área de estudo são subdivisões de domicílios, enquanto as atividades produtivas são mais desagregadas pelos tipos de empregos. Para o solo, ainda existem modelos que o tratam como uma única entidade, subdividindo-o apenas em unidades espaciais, enquanto outros o subdividem em usos pré-definidos. As viagens

são desagregadas sempre em função dos tipos (motivo, classe de renda, entre outros) e os modos dessas viagens, diferenciando-se apenas na quantidade possível dessas subdivisões. O TRANUS difere dos demais por dar liberdade ao usuário para indicar como cada entidade deve ser representada e também a quantidade de subdivisões que existirão.

2.2.3 Aleatoriedade do processo decisório

Modelos matemáticos podem simular as decisões de duas formas: com determinismo ou reconhecendo sua estocasticidade. Aqueles ditos determinísticos sempre produzirão o mesmo resultado para um mesmo dado de entrada (Barra, 1989); enquanto os modelos estocásticos produzirão resultados diferentes (Acheampong e Silva, 2015). Como não há dúvidas sobre o elevado grau de aleatoriedade do fenômeno urbano, ocorre uma tendência dos modelos de se tornarem mais estocásticos, assim como mais desagregados (Wegener, 2004).

Modelos de interação espacial não possuem em sua estrutura nenhuma teoria estocástica. Já nos modelos econométricos, apesar de serem baseados nas observações individuais, seus resultados são probabilidades que não se alteram para um mesmo conjunto de dados; alguns autores até os classificam como probabilísticos. Quanto aos modelos de microssimulação, esses são no geral estruturalmente dependentes dos modelos multinomiais *logit* que, apesar de possuírem probabilidades de escolha nas decisões, também produzem um único resultado para os mesmos dados. O IRPUD, URBANSIM e ILUMASS por possuírem em sua estrutura um processo de amostragem aleatória, especificamente o método de Monte Carlo, podem ser consideradas plataformas mais probabilísticas que as demais; entretanto, nenhuma das fontes consultadas os apontam como sendo estocásticos. Essa amostragem aleatória é utilizada na definição do conjunto de alternativas de escolha para os domicílios e empregos que necessitam se localizar. Se cada modelo for executado apenas uma vez, o que pode ocorrer por conta do elevado tempo de execução dessas plataformas (Ševčíková, Raftery e Waddell, 2007), isso pode comprometer a análise de variabilidade da modelagem.

2.2.4 Dinamicidade das decisões

Processos que modificam a estrutura urbana e são significativos no desenvolvimento das cidades possuem diferentes escalas temporais (Wegener, Gnad e Vannahme, 1986); portanto, percebê-las e modelá-las têm sido tema de debate entre pesquisadores da modelagem urbana (Miller, 2003; Wegener, 1994). Timmermans e Arentze (2011) defendem que modelar a

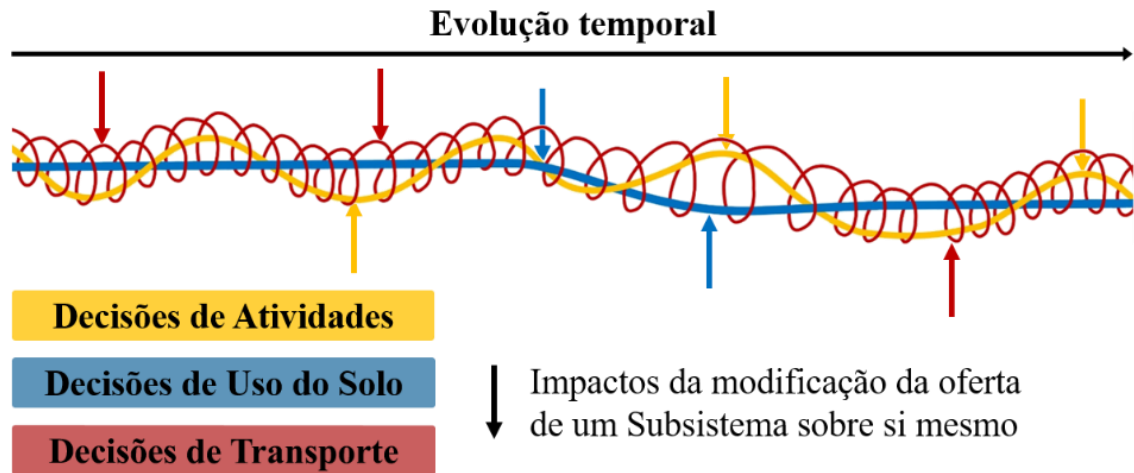
dinâmica urbana é importante para a previsão das modificações de comportamento dos tomadores de decisão ao longo do tempo, sendo fundamental para avaliar as alternativas de intervenção. Para um modelo ser dinâmico, ele deve modelar as mudanças de decisões de um subsistema ao longo do tempo, não apenas em um ponto específico (Berechmann e Small, 1988; Waddell, 2002), e ainda considerar que as decisões possuem diferentes escalas de tempo (Wegener, 2004).

Uma representação que acreditamos se adequar a esta definição de dinamicidade é apresentada na Figura 5. Neste caso, as decisões de viagens (decisões da demanda do subsistema de transportes) são as mais rápidas, uma vez que os indivíduos decidem num curto intervalo de tempo se irão ou não se deslocar, qual modo e rota utilizar. As decisões locais que envolvem o consumo de solo (decisões da demanda do subsistema de uso do solo) são as mais lentas. Por fim, as decisões que não envolvem componentes espaciais (decisões da demanda do subsistema de atividades), como a decisão de participar ou não de determinada atividade, se modifica a uma velocidade intermediária entre as duas citadas previamente (Wegener, Gnad e Vannahme, 1986). Cada um desses tipos de decisões pode ser influenciado por modificações na oferta do subsistema a que pertencem, por exemplo, a modificação na divisão modal de uma cidade por conta de uma linha de metrô que acaba de ser implantada; mas podem também se modificar por conta das decisões de outros subsistemas, como no caso da localização de novas atividades, com alterações no uso do solo, ao longo dessa mesma linha de metrô.

Como sugere Wegener (2004), a definição de dinamicidade está atrelada a definição de equilíbrio, pois se as decisões se modificam em escalas temporais distintas então não existe equilíbrio entre essas decisões. É mais provável que os subsistemas urbanos estejam em um constante processo de adaptação inercial, com os atores tomando decisões considerando não apenas o desempenho passado do subsistema, mas também as condições esperadas para o futuro (Hunt, Kriger e Miller, 2005).

O equilíbrio, quando utilizado para classificar modelos LUTI, pode ser compreendido como o processo que limita a demanda a partir da capacidade do subsistema, garantido assim que toda a demanda (de viagens, de solo, ou de atividades) será atendida. Por exemplo, se existir uma demanda por morar em uma região valorizada de uma cidade, mas não existirem residências suficientes, os modelos que consideram equilíbrio irão modificar os atributos dessa decisão, como o preço do solo, até que a demanda seja compatível com a capacidade ofertada; enquanto modelos que não consideram o equilíbrio manterão a demanda naquela região até que alguma residência esteja disponível.

Figura 5 - A dinamicidade entre os subsistemas



Fonte: Elaborado pelo autor.

Utilizando os conceitos discutidos acima, a Tabela 2 classifica os modelos quanto à sua dinamicidade de acordo com três características: a) indicadores responsáveis pelas interações entre as decisões do subsistema de uso do solo (US) e o de transportes (T); b) escalas temporais das decisões de cada subsistema; c) análise da premissa de equilíbrio nos modelos utilizados nas decisões de viagens e de localização de atividades. Como a representação do fenômeno em três subsistemas ainda é incipiente na literatura e, como vimos anteriormente, a maior parte dos modelos não modela satisfatoriamente o subsistema de atividades, então apenas os dois subsistemas tradicionais (US e T) da modelagem LUTI foram considerados.

Todos os modelos contemplam uma relação dinâmica entre os dois subsistemas, ou seja, mesmo as plataformas que não modelam o subsistema de transportes necessitam de informações complementares sobre o que acontece nesse subsistema. Quanto às escalas temporais, as decisões são modeladas em intervalos discretos de tempo; ou seja, nenhum modelo simula continuamente o funcionamento dos subsistemas, como ilustrado na Figura 5. Esse intervalo discreto de tempo é definido pela escala temporal do uso do solo, geralmente um ano; dessa forma, as decisões modeladas são típicas deste intervalo, inclusive as decisões de transportes que são modeladas para o período de pico diário considerado representativo de um ano. Por fim, os modelos se subdividem entre aqueles com e sem premissa de equilíbrio. Todos os modelos que simulam o subsistema de transportes assumem equilíbrio para modelá-lo, assim como os modelos econométricos na modelagem do uso do solo.

Tabela 2 - Características da dinamicidade dos modelos operacionais LUTI

MODELOS LUTI	a) Indicadores das Inter Relações		b) Escala Temporal		c) Premissa do Modelo	
	US → T	T → US	US	T	US	T
LILT Mackett (1983)	Efeito do Uso do Solo	Acessibilidade calculada internamente	Normalmente espaçado a cada 5 anos	Pico e Fora Pico	Não Assume Equilíbrio	Assume Equilíbrio
ITLUP Putman (1991)	Localização das Residências	Tempos de Viagem	Espaçado a cada 5 anos	(<i>Não Identificado</i>)	Não assume Equilíbrio	Assume Equilíbrio
IRPUD Wegener (2011)	Interação Espacial das Atividades	Acessibilidade calculada internamente	Espaçado no mínimo a cada 1 ano	Quatro horas do pico da manhã	Assume Equilíbrio	Assume Equilíbrio
TRANUS Barra (1989)	Demanda por Transportes	Acessibilidade e custos de transportes calculados internamente	Período discreto de tempo não definido	Período discreto de tempo não definido	Assume Equilíbrio	Assume Equilíbrio
MUSSA Martínez (1996)	Localização de Atividades	Medidas de Acesso calculadas externamente	Espaçados em períodos de anos, mas sem definir a quantidade	*	Assume Equilíbrio	*
DELTA Simmonds (1999)	Relações por zona entre domicílios e empregos	Acessibilidade e Variáveis ambientais calculadas internamente	Espaçados em períodos de anos, mas sem definir a quantidade	*	Assume Equilíbrio	*
URBANSIM Waddell (2002)	Demanda por Viagens	Acessibilidade calculada internamente, a partir de dados externos	Espaçado a cada 1 ano	*	Não Assume Equilíbrio	*
ILUMASS, Moeckel <i>et al</i> (2007)	Localização de Atividades	Acessibilidade, calculada internamente	A demanda se altera anualmente e a oferta a cada 3 anos.	Dia Todo	Não Assume Equilíbrio	(<i>Não Identificado</i>)

*: Não modela o Subsistema de Transportes

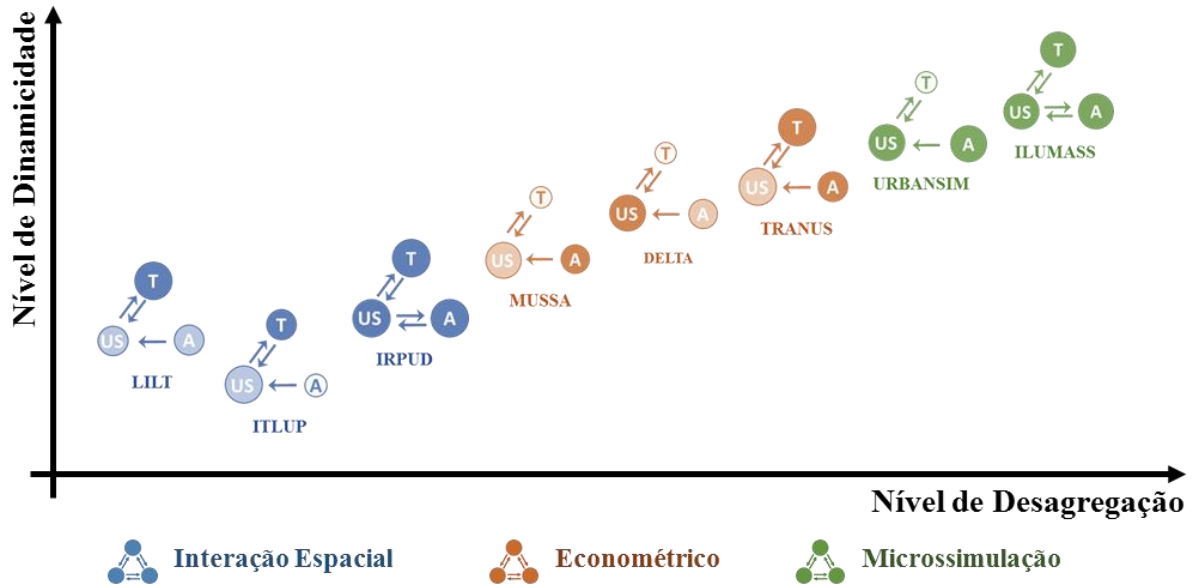
Fonte: Elaborado pelo autor.

2.3 Considerações finais

Unindo todas as características analisadas foi construída a representação da Figura 6 que compara o quão uma plataforma de modelagem LUTI é mais agregada ou dinâmica que outra. Não foi incorporada a análise quanto à aleatoriedade do processo decisório, pois todos os modelos foram considerados na sua essência determinísticos. Percebe-se que a fundamentação teórica à qual a plataforma operacional LUTI é embasada pode ser também um indicativo de como os modelos poderiam ser classificados. Modelos de interação espacial são aqueles mais estáticos e mais agregados. Já os modelos econométricos são mais desagregados e dinâmicos que os anteriores. Por fim, os representantes dos modelos de microssimulação, apesar do seu

menor nível de agregação espacial, não apresentam um salto significativo no seu nível de dinamicidade em relação aos modelos econométricos.

Figura 6 - Síntese da análise conceitual dos modelos LUTI



Fonte: Elaborado pelo autor.

No que tange ao nível de detalhamento do fenômeno urbano, vale destacar que todos os modelos analisados possuem uma limitação na representação do subsistema de atividades, seja pela excessiva simplificação da sua modelagem ou pelo não reconhecimento de todas as suas relações com os demais subsistemas. Reconhecer a possibilidade de interação deste subsistema com os demais, e não apenas como um dado de entrada nos modelos LUTI, permite compreender como as decisões locacionais e de viagens dos distintos atores do sistema urbano são capazes de impactar nas decisões de realização de atividades (sociais, econômicas e culturais) nesta cidade, as quais tanto são responsáveis pela geração das viagens, como pela necessidade de se localizar.

Vale ainda salientar que este capítulo se limitou a analisar aqueles modelos cuja teoria é amplamente discutida pela literatura especializada. Entretanto, existem modelos desenvolvidos mais recentemente que também merecem um esforço sistematizado de análise a fim de verificar como podem contribuir para a compreensão e modelagem do fenômeno urbano. Alguns exemplos valem ser citados, como o MARS (Pfaffenbichler, 2003) e o UDM (Swanson e Gleave, 2008) que são baseados na teoria de sistemas dinâmicos (Forrester, 1999), podendo contribuir no entendimento de como as relações entre os subsistemas urbanos ocorrem. Neste grupo, também podem ser inseridos os modelos baseados em autômatos celulares, como o

MALUT (Kii e Doi, 2005) que, apesar de ser um modelo LUTI de microssimulação, considera a cidade em um nível de complexidade tão elevado que é incapaz de modelá-la utilizando modelos matemáticos pré-determinados.

Os modelos que mais se destacaram nessa análise foram o TRANUS, o URBANSIM e o ILUMASS. Eles foram considerados capazes de modelar adequadamente o fenômeno urbano. Como visto, possuem características que os distinguem como o nível de agregação, a aleatoriedade e a dinamicidade dessas decisões. O ILUMASS e o URBANSIM são espacialmente mais desagregados, entretanto os elementos desse fenômeno (moradores, atividades produtivas, solo e viagens) são modelados de maneira mais rígida que no TRANUS, pois a quantidade e a unidade das subdivisões estão pré-estabelecidas. Os três modelos são determinísticos, pois são fundamentalmente baseados em modelos de escolha discreta. Por fim, o TRANUS é o modelo menos dinâmico entre eles, já que possui premissa de equilíbrio tanto para modelar o subsistema de transportes, quanto o de uso do solo.

Os capítulos a seguir utilizarão o TRANUS para avaliar como o processo de calibração pode contribuir na compreensão da problemática, foco do planejamento urbano integrado. Essa escolha tem caráter operacional, pois o URBANSIM não modela o subsistema de transportes, o que limitaria a análise do fenômeno urbano como um todo com um ferramental. E o ILUMASS, apesar de mais desagregado e dinâmico ainda está em desenvolvimento.

3 MODELAGEM INTEGRADA NO TRANUS

No capítulo anterior, modelos LUTI foram analisados quanto à sua capacidade de simular as intra e inter-relações dos subsistemas urbanos. Também foram discutidas três características desses modelos: nível de agregação, aleatoriedade e dinamicidade. Apesar de cada plataforma computacional ter sido tratada pelo nome de “modelo”, reconhece-se que cada uma delas é na verdade um conjunto de modelos, os quais possuem suas respectivas premissas e limitações. Dessa forma, o nível de agregação e a aleatoriedade são características intrínsecas de cada modelo interno, enquanto a característica de dinamicidade vai além, tratando também das premissas de interação entre eles.

O TRANUS foi posto como um modelo LUTI capaz de simular as intra e inter-relações entre os subsistemas urbanos. Entretanto, reconhecer a capacidade de modelar essas relações é apenas a primeira etapa para que o processo de calibração de um modelo LUTI auxilie na compreensão do fenômeno. Entende-se que a segunda etapa deste processo deve focar em compreender os modelos matemáticos e de simulação computacional para que as premissas sejam reconhecidas e conseqüentemente as vantagens e desvantagens dessa modelagem.

Neste contexto, este capítulo trata de realizar uma análise do modelo TRANUS para atender ao segundo objetivo específico deste trabalho: analisar os modelos matemáticos e de simulação computacional incorporados na plataforma LUTI selecionada, identificando seus parâmetros que podem representar indicadores úteis na caracterização e diagnóstico da problemática em foco e as limitações de representação do fenômeno inerentes aos modelos. Tal análise foi realizada a luz da característica de dinamicidade, já que é intrínseco a ela possuir medidas de impacto, responsáveis pela interação entre os subsistemas; e medidas de desempenho, internas a cada subsistema e resultados da relação entre demanda e oferta.

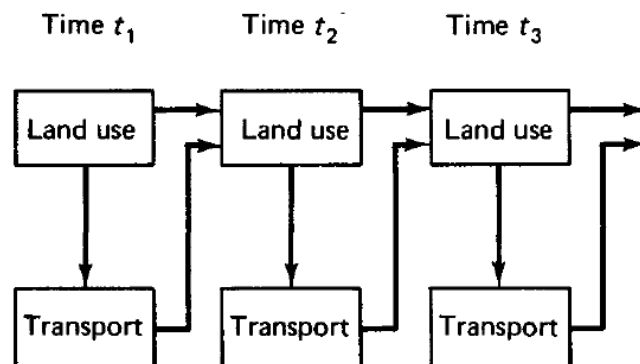
Sendo assim, foram primeiro analisados os indicadores utilizados pelo TRANUS para representar a interação entre os subsistemas (seção 3.1). Em seguida, foram analisados os modelos responsáveis por simular as decisões do subsistema de atividades (seção 3.2). A análise dos modelos das decisões de demanda e dos elementos da oferta do subsistema de uso do solo ocorre na seção 3.3 e dos modelos de transporte na seção 3.4. O modelo de interface é analisado na seção 3.5 e finaliza-se com as considerações finais na seção 3.6. Tais análises foram construídas buscando: a) descrever os modelos e indicadores utilizados em cada etapa; b) identificar os parâmetros de calibração, avaliando como podem auxiliar na compreensão do fenômeno; e c) identificar as premissas embutidas nos modelos e nos indicadores, reconhecendo

a capacidade e as limitações em representarem adequadamente a decisão, ou o elemento do fenômeno ao qual se propõem.

3.1 Modelagem das inter-relações entre os subsistemas

O TRANUS considera períodos de tempo distintos para que os subsistemas se modifiquem, como pode ser visto na Figura 7, que representa a interação entre os dois conjuntos de modelos: o de uso do solo e o de transportes. Por essa representação, percebe-se que o subsistema de uso do solo impacta o subsistema de transportes no mesmo período de tempo, ou seja, reconhece que qualquer modificação nos padrões de ocupação territorial irá imediatamente modificar os padrões de deslocamento. Enquanto modificações do subsistema de transportes apenas impactam o subsistema de uso do solo no período de tempo subsequente. Essas premissas de dinamicidade estão de acordo com o que defendem Wegener, Gnad e Vannahme (1986), que apontam as decisões do subsistema de transportes como sendo o elemento do fenômeno urbano que se modifica de maneira mais rápida.

Figura 7 - Relações dinâmicas nos sistemas de uso do solo e de transportes



Fonte: Barra (1989).

A representação da Figura 7 auxilia também a identificar a quantidade de indicadores responsáveis pelas relações entre os subsistemas. Existem três medidas que impactam esses subsistemas ao longo do tempo: uma que sai dos modelos de uso do solo para impactar os modelos de transportes; uma segunda que sai dos modelos de transportes para impactar os modelos de uso do solo no tempo seguinte; e uma última, responsável pela interação dos modelos de uso do solo ao longo do tempo. As duas primeiras são relações entre subsistemas e serão discutidas nas seções a seguir: a medida de acessibilidade, responsável pelo impacto do

subsistema de transportes no uso do solo na seção 3.1.1; e a medida de impacto do uso do solo nos transportes na seção 3.1.2. A terceira, por ser uma relação temporal do uso do solo, será discutida apenas na seção 3.3.

3.1.1 Medida de impacto dos transportes

Barra (1989) reconhece como acessibilidade a medida de impacto que sai do subsistema de transportes para o subsistema de uso do solo. A acessibilidade é um conceito que tem se tornado central no processo de planejamento há mais de 50 anos (Geurs, Montis, De e Reggiani, 2015). Seu conceito surgiu como uma medida do potencial de oportunidades de interação entre o homem e o meio (Hansen, 1959), mas é comum encontrar outras definições que tendem a se complementar (Bhat *et al.*, 2000; Geurs e Eck, 2001; Hull, Silva e Bertolini, 2012), incorporando na definição elementos dos subsistemas de uso do solo e de atividades. Neste trabalho, utiliza-se a definição de Cascetta (2009), Wegener (1995) e Lopes (2015), que representam a acessibilidade como a medida de desempenho da relação entre a demanda e a oferta do subsistema de transportes responsável por impactar os demais subsistemas.

Para medir a acessibilidade, diversas abordagens já foram propostas. Geurs e Van Wee (2004) separam essas medidas em quatro tipos: 1) baseadas em infraestrutura: analisam o nível de serviço da infraestrutura de transporte; 2) baseadas em localização: analisam a acessibilidade nas localizações, tipicamente no nível macro e descrevem o nível de acessibilidade até as atividades espacialmente distribuídas; 3) baseadas em pessoas: analisam a acessibilidade no nível do indivíduo, considerando as restrições temporais e espaciais; 4) baseadas em utilidade: analisam os benefícios econômicos que as pessoas obtêm a partir do acesso às atividades espacialmente distribuídas. Esse quarto tipo tem sido reconhecido como o que mais satisfaz as necessidades dos modelos LUTI (Acheampong e Silva, 2015).

O TRANUS utiliza uma medida baseada em utilidade para quantificar a acessibilidade. A compreensão do que é essa medida está diretamente relacionada com os modelos de escolha discreta, que simulam a decisão de um indivíduo ou empresa entre um conjunto de alternativas distintas, com o objetivo de compreender e prever o processo decisório que leva à sua tomada de decisão. Isso é feito a partir de uma perspectiva de causa e efeito, pois assume-se que existem atributos que determinam essa decisão, sendo alguns observáveis (x) e outros não (ε). Esses atributos são agrupados em uma função “ $y = f(x, \varepsilon)$ ”, ou utilidade, que permite a determinação da escolha do indivíduo, dado “ x ” e “ ε ”. Entretanto, “ ε ” é não observável e essa decisão não

pode ser exatamente predita, portanto são obtidas probabilidades de escolhas, a partir da consideração de uma distribuição para o termo “ ε ” (Train, 2009).

O modelo *logit* possui a premissa de que os termos “ ε ” são independentes e identicamente distribuídos (IID) por uma função do tipo Gumbel. Dessa forma, a probabilidade de que o indivíduo escolha uma alternativa “ i ” num conjunto “ C ” é dada pela Equação 1 (Hensher, Rose e Greene, 2005). A premissa de IID possui uma associação comportamental com a independência das alternativas irrelevantes (IIA), ou seja, a razão entre as probabilidades de escolha de qualquer par de alternativas é independente da presença ou ausência de qualquer outra alternativa no conjunto de escolha (Hensher, Rose e Greene, 2005).

$$Pr_C(i) = \frac{e^{V_i}}{\sum_k e^{V_k}} \quad (1)$$

Os modelos aninhados foram criados para relaxar a premissa de IID dos modelos *logit* e poder ser aplicado em situações em que o termo de erro da função de utilidade não é independente entre as alternativas. Esses modelos capturam os atributos não observáveis em comum entre alternativas. A ideia básica é repartir o conjunto universal “ C ” em “ M ” subconjuntos. Cada alternativa pertencerá a apenas um subconjunto, de tal forma que aquelas que compartilham atributos não observáveis pertençam ao mesmo subconjunto. Dentro de cada subconjunto a premissa de IID se mantém, entretanto, ela não se mantém para alternativas de subconjuntos distintos. Dessa forma, a decisão do nível superior, ou do tipo composta, é escolher entre os subconjuntos de alternativas. E a decisão do nível inferior, ou elementar, é escolher entre as alternativas internas ao subconjunto escolhido no nível superior. Nestes casos, diz-se que existe interdependência entre as decisões, pois a probabilidade de escolher um modo “ C ” será condicional a probabilidade de escolher um subconjunto “ M ”, como pode ser visto na Equação 2 (Hensher, Rose e Greene, 2005).

$$Prob [sub (M) e alt (C)] = Prob(sub) * Prob(alt | sub) \quad (2)$$

No TRANUS, são utilizados modelos aninhados para representar a escolha de conjuntos de modos e de rotas. A decisão composta é a escolha entre conjuntos de modos. Tais conjuntos são formados por modos os quais os usuários podem realizar integração, ou transbordo, por exemplo: os modos motorizados coletivos e os modos motorizados individuais. Já a decisão

elementar é a escolha de rotas. Perceba que não existe a decisão do modo, pois uma mesma rota poderá utilizar diversos modos, que pertençam ao mesmo conjunto de modos. Por exemplo, uma rota poderá utilizar inicialmente uma linha de metrô, mas ser finalizada através de uma linha de ônibus, desde que os dois modos pertençam ao mesmo conjunto.

No exemplo da Figura 8, supõe-se a existência de dois conjuntos de modos, o A e o B e duas rotas para cada conjunto: rotas 1 e 2 para o conjunto A e rotas 3 e 4 para o conjunto B. Percebe-se que ocorrerá a aplicação do modelo multinomial *logit* três vezes. Na primeira, serão utilizadas as utilidades dos conjuntos de modos e resultará nas probabilidades de escolha de cada um deles, logo a soma das probabilidades das duas alternativas deverá ser igual a um. A segunda utilizará as utilidades das rotas 1 e 2 e resultará nas probabilidades condicionais de se escolher uma das duas rotas dado que o conjunto A foi escolhido. A soma dessas duas probabilidades também deverá ser igual a um. E a terceira é similar a segunda, mas utilizando as rotas 3 e 4 do conjunto B. Para se conhecer diretamente a probabilidade real que um indivíduo possui de escolher a Rota 1, ou qualquer uma das outras rotas, deverá ser realizada a multiplicação da probabilidade do seu conjunto de modo com sua respectiva probabilidade condicional. Dessa forma, a soma das probabilidades reais de cada rota também será igual a um.

Para operacionalizar a utilização de mais de um modo em uma mesma rota, o TRANUS utiliza como utilidade da decisão elementar a soma das utilidades de cada link da rota. Tais utilidades são representadas a partir do custo generalizado, que possui quatro principais elementos: 1) custos monetários do trajeto, como o consumo de combustível, o pagamento de pedágios, ou a tarifa do táxi; 2) custos monetizados do trajeto, como o custo do tempo de viagem, obtido pela multiplicação do tempo dentro do veículo, pelo seu valor monetário; 3) custos monetários e monetizados relacionados com a entrada em um modo de transporte, como a tarifa de embarque no transporte público, mais o custo com o tempo perdido na espera pelo embarque ou transbordo, obtido pela multiplicação do respectivo tempo de espera pelo seu valor; 4) parâmetros para cada um dos três elementos anteriores específicos para cada tipo de viagem, incluindo aqui os valores de tempo.

Ao se considerar que os atributos utilizados na utilidade na decisão elementar podem ter influência na escolha da decisão composta, então é necessário incluir essa informação nas expressões de utilidade de cada alternativa. Esta conexão é realizada através de um índice denominado por utilidade máxima esperada (UME). Este índice sugere que a probabilidade de um indivíduo escolher cada alternativa da decisão composta é influenciada pelas utilidades de

cada alternativa da decisão elementar, que não dependem apenas da parte observável dessa função.

Figura 8 - Utilidades e probabilidades do modelo aninhado

Decisão Composta: Conjuntos	Alternativa	Conjunto de Modos A		X	Conjunto de Modos B		
	Utilidade	U A			U B		
	Probabilidade	Pr (A)			Pr (B)		
Decisão Elementar: Rotas	Alternativa	Rota 1	X	Rota 2	Rota 3	X	Rota 4
	Utilidade	U 1		U 2	U 3		U 4
	Probabilidade Condicional	Pr (1 A)		Pr (2 A)	Pr (3 B)		Pr (4 B)
	Probabilidade Real das Rotas	Pr (A) * Pr (1 A)		Pr (A) * Pr (2 A)	Pr (B) * Pr (3 B)		Pr (B) * Pr (4 B)
	Relações	Pr (A) + Pr (B) = 1 Pr (1 A) + Pr (2 A) = 1 Pr (3 B) + Pr (4 B) = 1 Pr (A) * Pr (1 A) + Pr (A) * Pr (2 A) + Pr (B) * Pr (3 B) + Pr (B) * Pr (4 B) = 1					
X - Aplicação de Modelo Multinomial Logit							

Fonte: Elaborado pelo autor.

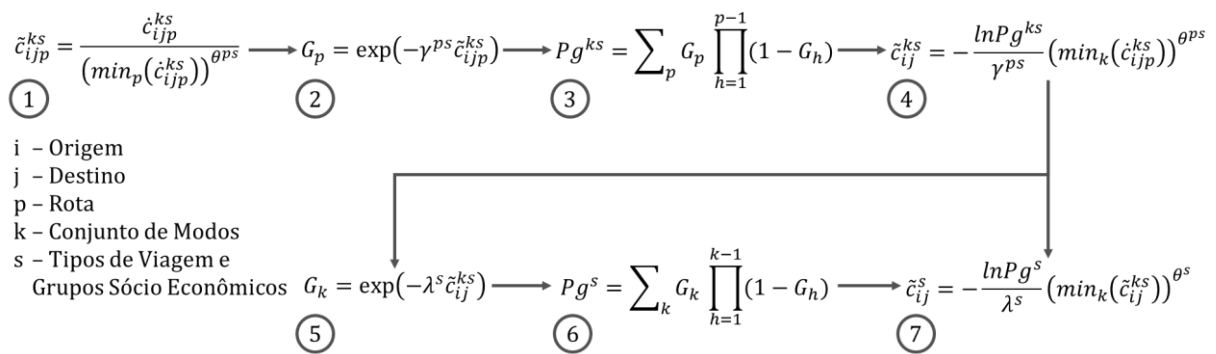
Portanto, a busca pelo maior nível de utilidade envolve alguma “expectativa” sobre o que pode ser obtido a partir do termo não observável de cada alternativa da decisão elementar. A utilidade máxima esperada pode receber diversos nomes, como valor incluso, *logsum* e também custo composto (Hensher, Rose e Greene, 2005), mas matematicamente é igual ao logaritmo natural do denominador do modelo multinomial *logit* aplicado às alternativas elementares, como é apresentado na Equação 3.

$$UME = \ln \left(\sum_c e^{V_c} \right) \quad (3)$$

Dessa forma, a utilidade de uma decisão composta é formada pelos atributos intrínsecos às alternativas somados ao custo composto das respectivas alternativas elementares. No

TRANUS, o cálculo do custo composto sofre uma modificação, pois o cálculo da Equação 3 pode resultar em um valor negativo (Williams, 1977). O processo de cálculo do custo composto pelo TRANUS é esquematizado na Figura 9, onde o termo “ \dot{c}_{ijp}^{ks} ” da formulação 1 é o custo generalizado e o termo “ \tilde{c}_{ijp}^{ks} ” é a utilidade (ou desutilidade, já que são custos para o deslocamento) utilizada na decisão elementar: a de escolha de rotas. O termo “ \tilde{c}_{ij}^{ks} ”, na formulação 4, é o custo composto da decisão de conjunto de modos. E o termo “ \tilde{c}_{ij}^s ”, na formulação 7, é um segundo custo composto, que é a medida de acessibilidade do TRANUS.

Figura 9 - Desutilidade composta de transportes



Fonte: Elaborado pelo autor.

Fonte das Equações: Barra (2012).

Para que se compreenda o motivo pelo qual o custo composto pode também ser utilizado como medida de acessibilidade é necessário recorrer a conexão entre a teoria de escolha discreta e as teorias de microeconomia tradicionais, as quais são baseadas na suposição de que as preferências do consumidor podem ser utilizadas para originar um indicador de valor dos benefícios de uma determinada escolha (Geurs e Eck, 2001). Uma das medidas clássicas para medir esses benefícios é denominada de excedente do consumidor, que é a diferença entre o preço que um indivíduo está disposto a pagar por uma certa quantidade de um produto e o que ele realmente paga para possuir o bem (Marshall, 1920). Na teoria de escolha discreta, o excedente do consumidor seria a máxima utilidade esperada que o indivíduo atribui a uma escolha (Jong *et al.*, 2005; Kohli e Daly, 2006; Small e Verhoef, 2007). Matematicamente o excedente do consumidor é expresso pela Equação 4 (Kohli e Daly, 2006).

$$E(CS_n) = \frac{1}{\alpha_n} \ln \left(\sum_k e^{V_{kn}} \right) + C \quad (4)$$

A expressão “ $\ln(\sum_k e^{V_{kn}})$ ” fornece o excedente do consumidor para um indivíduo, ou seja, o custo composto de uma formulação *logit*. “ α_n ” é um coeficiente que transforma a utilidade em unidades monetárias, transformação esta que é de interesse para análises econômicas. E “ C ”, uma constante desconhecida que representa o fato de que o nível absoluto da utilidade não pode ser mensurado. “ $E(CS_n)$ ” é o excedente médio do segmento da população que é representada por um indivíduo “ n ”, cujas utilidades “ V_{kn} ” são representativas desse grupo. Portanto, o custo composto serve como uma medida de conveniência do conjunto de alternativas oferecido aos tomadores de decisão (Small e Verhoef, 2007).

Os dois custos compostos calculados pelo TRANUS além de serem fundamentais na modelagem das decisões da demanda por transportes e por uso do solo, são capazes de auxiliar a compreender o fenômeno urbano e sua respectiva problemática. O custo composto “ \tilde{c}_{ij}^{ks} ”, utilizada na decisão dos conjuntos de modos, permite concluir que a acessibilidade de um mesmo tipo de viagem e grupo sócio econômico “ s ” pode ser diferente a depender do conjunto de modos “ k ” que utiliza. Já o custo composto “ \tilde{c}_{ij}^s ” auxilia a entender como a acessibilidade difere entre os distintos tipos de viagens e grupos sócio econômicos “ s ” e também dentro do mesmo grupo de forma espacializada, a partir de suas origens “ i ” e destinos “ j ”. Segundo Garcia (2015), identificar como a acessibilidade pode ser diferente ao longo do espaço, entre grupos sócio econômicos e entre modos de transportes permite a caracterização e possivelmente o diagnóstico de três problemas de distribuição da acessibilidade: a distribuição desigual, a distribuição não-equânime e a distribuição inadequada, respectivamente relacionadas com as três comparações.

3.1.2 Medida de impacto do uso do solo e das atividades

Diferentemente da acessibilidade, não existe uma discussão mais aprofundada sobre a medida de impacto que sai dos subsistemas de uso do solo e de atividades e que impacta diretamente o subsistema de transportes. Cascetta (2009) apenas reconhece que existe algum impacto, enquanto Wegener (1995) trata essa interação como distribuição espacial das atividades. Já Lopes (2015) reconhece medidas de impacto distintas por subsistemas, a “distribuição espacial dos usos” como resultado do subsistema de uso do solo e a “participação das atividades” como resultado do subsistema de atividades. No TRANUS, essa medida de impacto é definida por “demanda por transporte” e quantificada através de um único indicador:

os fluxos econômicos, mas que tanto possui elementos do subsistema de uso do solo, quanto do de atividades.

A representação da população e das atividades econômicas no TRANUS é realizada a partir de uma visão industrial, onde cada um desses grupos é denominado de setor. Lowry (1964) subdivide os setores existentes em três grupos:

- Setores Básicos: incluem indústrias, comércios e edificações administrativas, cujos clientes estão localizados fora da área de estudo. A localização destas atividades não é impactada por problemas de acesso e seus níveis de emprego são dependentes de eventos externos.
- Setores de Varejo: incluem os comércios e serviços administrativos que lidam diretamente com a população residente local. Como esses setores possuem clientes locais, sua localização é dependente da acessibilidade e as taxas de crescimento de emprego podem ser assumidas próximas aos de crescimento da população.
- Setores Populacionais: é assumido que o nível de residentes é dependente dos empregos dos setores de varejo, que, por sua vez, dependem do número de pessoas. Suas localizações são fortemente influenciadas pela localização dos lugares de trabalho.

No TRANUS, parte-se dos setores básicos, cujas demandas ocorrem fora da área de estudo, pois suas quantidades e localizações de produção são tratadas como dados de entrada ao modelo. O produto a ser produzido pelos setores básicos necessita de insumos, ou seja, produtos de outros setores, que são chamados de setores induzidos e podem ser do tipo varejo ou populacional. Sendo assim, o modelo determina a produção induzida desses novos produtos e as localiza espacialmente. Ao mesmo tempo, os setores induzidos demandam outros insumos, gerando uma cadeia de produção e localização das atividades. Essas relações entre os diversos setores dão origem aos fluxos econômicos (Barra, 2012).

Apresentado esse conceito inicial, onde os fluxos econômicos são explicados a partir da cadeia industrial de produção e consumo, parte-se agora para ampliar este conceito e introduzir uma interpretação com base no que cada setor está realmente representando. Como visto, os setores básicos e de varejo representam as diversas atividades econômicas de uma região, sejam elas do setor primário, secundário ou terciário. Essas atividades podem ser representadas por diversas unidades, como quantidade de empregos ou quantidade de edificações para representar a atividade comercial ou de serviços. A educação pode ser representada, através da quantidade de empregos, matrículas, número de escolas, entre outros; os serviços hospitalares, através da quantidade de leitos, número de hospitais, ou área do hospital; ou ainda o setor populacional,

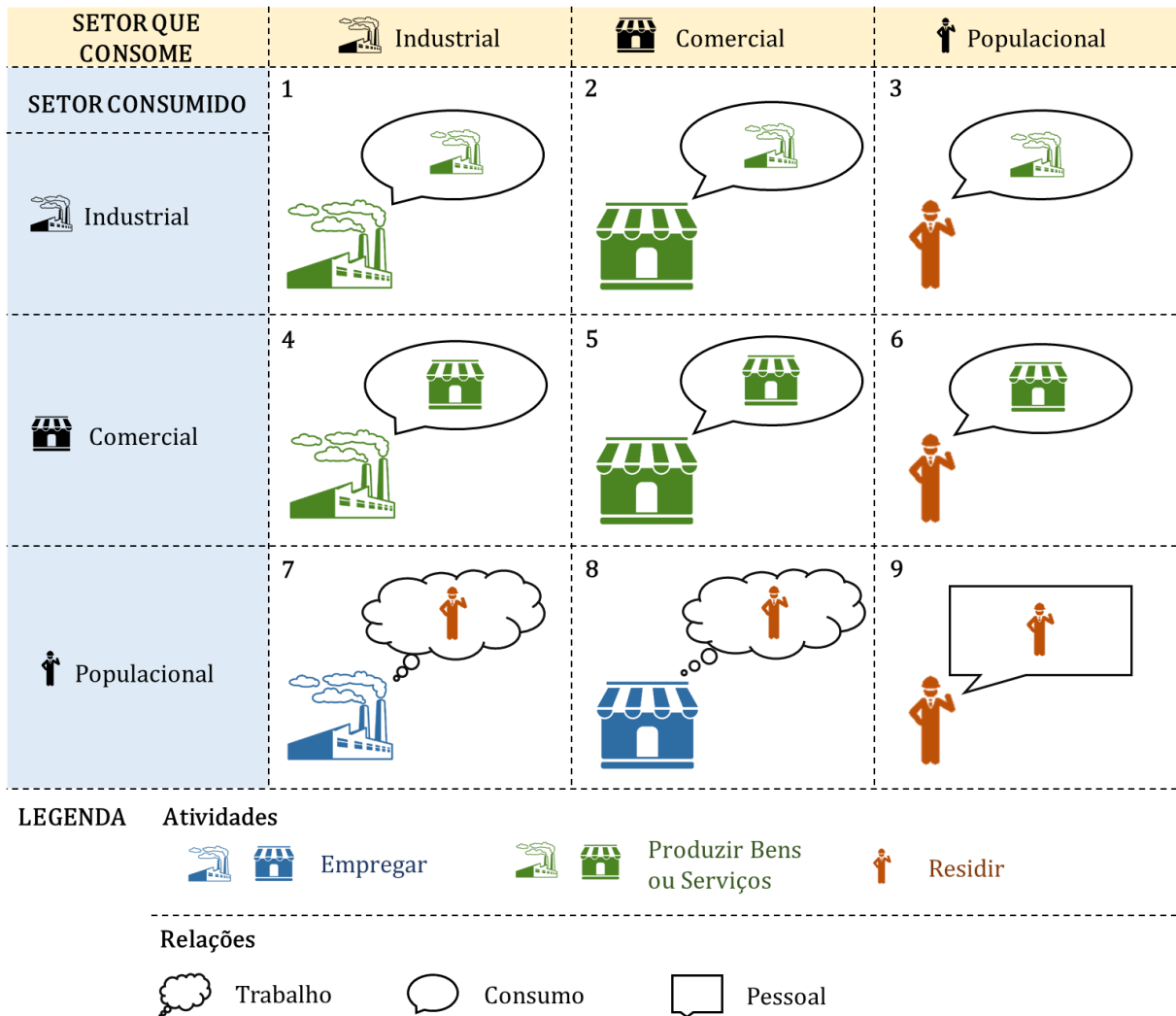
que representa os moradores da região de estudo, através da quantidade de pessoas, ou de domicílios, por exemplo.

Em cada setor podem ocorrer as mais distintas atividades. Nos setores populacionais, a atividade principal que se desenvolve é a atividade de residir. Em um setor que represente o comércio, duas atividades principais se desenvolvem: comprar e empregar. No setor de serviços essas atividades seriam gerar serviços e empregar. No setor educacional seriam ofertar educação e empregar. As primeiras atividades de cada um desses setores representam suas respectivas atividades fins e serão a partir desse momento definidas como atividades de produzir bens e serviços.

Reconhecidas as atividades que podem ocorrer em cada setor, parte-se para a interpretação do que aciona a realização da atividade de produzir bens e serviços, ou de empregar nos setores de atividades produtivas. Retornando à ideia de que existe uma interligada cadeia de relações de produção e consumo entre esses setores, pode-se concluir que o que se é produzido e consumido são as próprias atividades. Portanto, em determinado momento esses setores estarão consumindo atividades, mas em outros eles estarão sendo consumidos, como pode ser visto na Figura 10. Quando um setor produtivo é consumido, significa que um outro setor está em busca do bem ou serviço fim deste serviço, ou seja, a atividade que está sendo demandada é a de produzir bens e serviços para que um outro setor possa consumi-la. Neste caso, independentemente do setor consumidor é gerada uma relação de consumo de bens ou serviços, como é retratado nas relações de 1 à 6 da Figura 10. A atividade empregar só aparece nessa cadeia, quando um setor produtivo consome um setor populacional, ou seja, quando se consome a atividade de residir, a partir de uma demanda da atividade de empregar. Neste caso, é gerada uma relação do tipo trabalho, como retratado nas relações 7 e 8. Quando setores populacionais se relacionam entre si é gerada uma relação de caráter pessoal, como apresentado na relação 9.

Algumas relações do tipo consumo podem ter interpretações específicas que são de suma importância para os padrões de deslocamento. Quando nestas relações, o setor a ser consumido é o educacional, o consumo que ocorre é o da oferta de educação, portanto essa relação pode ser entendida como uma relação de ensino. Já se esse setor representar as áreas de lazer, a demanda será pela atividade de fornecer opções de entretenimento, o que gerará relações de lazer. Entretanto, todas elas continuam representando o consumo de determinado serviço. Contudo, sua subdivisão pode ser relevante ao processo de compreensão da problemática.

Figura 10 - Relações entre as atividades



Fonte: Elaborado pelo autor.

As relações entre os setores são definidas a partir dos conceitos utilizados pela matriz insumo-produto, sendo Leontief o primeiro autor a discuti-la, em 1941. Muitas vezes as análises insumo-produto são chamadas de análises interindustriais, pois seu propósito fundamental é analisar a interdependência das indústrias na economia (Miller e Blair, 2009). Essas análises podem ocorrer para uma única região, ou podem possuir uma abordagem inter-regional, quando várias regiões são de interesse para a análise.

Para ser utilizada em um processo de planejamento, a modelagem de uma cidade no TRANUS necessitaria de uma subdivisão da área de estudo em zonas de análise. Essa subdivisão espacial faz com que a análise insumo-produto aplicada no modelo seja do tipo inter-regional. Dessa forma, os setores de uma determinada zona podem se relacionar com os setores de outra zona. Como exemplo, supõem-se dois setores (A e B) presentes em duas zonas (1 e 2),

como apresentado na Tabela 3. As relações entre esses setores geram 16 fluxos econômicos, que podem ser de dois tipos: intrarregionais, como aqueles dos quadrantes em azul; e inter-regionais, como os quadrantes em verde.

Tabela 3 - Fluxos econômicos inter-regionais

Consumidor		Zona 1		Zona 2	
		A	B	A	B
Produtor:					
Zona 1	A	X_{11}^{AA}	X_{11}^{AB}	X_{12}^{AA}	X_{12}^{AB}
	B	X_{11}^{BA}	X_{11}^{BB}	X_{12}^{BA}	X_{12}^{BB}
Zona 2	A	X_{21}^{AA}	X_{21}^{AB}	X_{22}^{AA}	X_{22}^{AB}
	B	X_{21}^{BA}	X_{21}^{BB}	X_{22}^{BA}	X_{22}^{BB}

Fonte: Elaborado pelo autor.

A utilização de matrizes insumo-produto inter-regionais produz pelo menos duas questões sobre a sua capacidade de representação do fenômeno urbano, em especial aquele voltado para o transporte de passageiros. Primeiro, será que a abordagem de modelagem utilizada conceitualmente para relacionar a produção e consumo de indústrias pode realmente ser utilizada como um indicador das relações entre a população e as atividades produtivas? Segundo, será que a abordagem inter-regional dessa matriz pode também ser aplicada para uma subdivisão espacial tão pequena, como as zonas de análise de um planejamento urbano?

A adoção de uma única medida de impacto do subsistema de atividades e de uso do solo não limita a compreensão do fenômeno, pois sua forma desagregada permite que a análise seja realizada de forma a diagnosticar as causas das modificações nos padrões de deslocamento. Por exemplo, para avaliar o impacto direto do subsistema de atividades, definido por Lopes (2015) como “participação nas atividades”, basta utilizar uma matriz como apresentada na Tabela 4, que agrega as informações por setores, deixando de fora o componente espacial.

Para avaliar apenas a medida de impacto do subsistema de uso do solo, definida por Lopes (2015) como a “distribuição espacial das atividades”, basta utilizar uma matriz como apresentada na Tabela 5 para o setor A, onde são excluídas as relações de dependência entre os setores e foca-se apenas em conhecer a distribuição espacial de cada um deles.

Tabela 4 - Fluxos econômicos sem elementos espaciais

	Consumidor: A	Consumidor: B
Produtor: A	$X^{AA} = X_{11}^{AA} + X_{12}^{AA} + X_{22}^{AA} + X_{21}^{AA}$	$X^{AB} = X_{11}^{AB} + X_{12}^{AB} + X_{22}^{AB} + X_{21}^{AB}$
Produtor: B	$X^{BA} = X_{11}^{BA} + X_{12}^{BA} + X_{22}^{BA} + X_{21}^{BA}$	$X^{BB} = X_{11}^{BB} + X_{12}^{BB} + X_{22}^{BB} + X_{21}^{BB}$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 5 - Fluxos econômicos sem relações entre setores

	Zona de Consumo: 1	Zona de Consumo: 2
Zona de Produção: 1	$X_{11}^A = X_{11}^{AA} + X_{11}^{AB}$	$X_{21}^A = X_{21}^{AA} + X_{21}^{AB}$
Zona de Produção: 2	$X_{12}^A = X_{12}^{AA} + X_{12}^{AB}$	$X_{22}^A = X_{22}^{AA} + X_{22}^{AB}$

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2 Modelagem do subsistema de atividades

A análise dos modelos de atividades não foi dividida em modelos de demanda e de oferta, pois apenas um modelo realiza todas as decisões que envolvem esse subsistema. Pela discussão anterior, verificou-se que a subdivisão dos setores irá variar de acordo com as análises que desejam ser realizadas. Por exemplo, se existe o intuito de avaliar as relações educacionais, é fundamental que exista um setor do tipo educacional. O setor populacional pode ser subdividido em classes de renda para se compreender como cada grupo de renda se relaciona de forma distinta com as atividades produtivas.

Como visto, os fluxos econômicos são o resultado de uma interligada cadeia de relações entre os setores. Entretanto, as intensidades desses fluxos dependem da intensidade das relações entre as atividades de cada par de setor. Em determinada análise pode não existir o interesse em quantificar as relações pessoais, aquelas que ocorrem entre as atividades de setores populacionais, logo não existirão fluxos econômicos que representem essas relações. Pode ser também que o setor populacional de alta renda possua relações de consumo mais fortes com a atividade do setor de serviços do que o setor populacional de baixa renda. Portanto, o modelo do subsistema de atividades é o responsável por quantificar essas relações, permitindo assim avaliar quais atividades possuem relações mais intensas.

As relações entre os setores são modeladas a partir dos coeficientes intersetoriais, ou coeficientes técnicos de uma matriz insumo-produto, que é a mesma teoria utilizada pelos

fluxos econômicos. A informação fundamental usada neste tipo de análise são os fluxos de produtos entre cada setor industrial considerado produtor, para cada um dos setores considerados consumidores (Miller e Blair, 2009). Dessas relações, é possível obter a matriz de coeficientes técnicos de insumo-produto, que representam a quantidade consumida de insumos para produzir cada unidade de um produto (Rueda-Cantucho, 2002). Esses coeficientes, apesar de serem considerados estáticos num curto tempo, podem sofrer modificações num período mais longo devido a modificações na tecnologia de produção, por conta disso, são considerados exógenos ao modelo do TRANUS (Barra, 1989).







Mais uma vez, parte-se da interpretação industrial presente na teoria de insumo-produto para interpretar o que os coeficientes técnicos realmente representam na modelagem, por meio dos conceitos de setores. Se na interpretação industrial, os coeficientes intersetoriais representam a quantidade de insumos necessários para a produção de uma unidade de um produto, então, na interpretação setorial pode-se inferir que os coeficientes representam a quantidade de atividades de um setor para que possa ser realizada uma atividade de outro setor.

Neste momento, é importante que as atividades sejam interpretadas a partir das unidades que quantificam cada um dos setores. Assumindo que os setores das atividades produtivas sejam representados pela quantidade de empregos e os setores populacionais pela quantidade de pessoas, então, na relação do tipo trabalho, o coeficiente técnico indicará a quantidade de pessoas que são necessárias para que exista um emprego. Na relação do tipo consumo, o coeficiente indicará a relação contrária: a quantidade de empregos necessários para que exista uma pessoa. Percebe-se que esses coeficientes irão variar a depender do tipo de setor que se esteja analisando. No exemplo da Figura 11, foram considerados seis setores: o primeiro setor (A) é básico e representa o setor industrial; dois são de varejo, portanto induzidos e representam o setor comercial (B) e o de serviços (C); e três são populacionais (D, E e F) divididos por classes de renda, também induzidos. As relações entre esses setores geram pelo menos cinco tipos de parâmetros.

O conjunto de parâmetros 1, 2 e 3 representam o que foi denominado de relações de consumo. O conjunto de parâmetros 1 está relacionado com a demanda pelo setor básico. Como as atividades desses setores não são consumidos por atividades da região de estudo, os parâmetros serão sempre zero. O tipo 2 é responsável pelo consumo das atividades fins dos setores de varejo, a partir dos setores de atividades produtivas. E os coeficientes do tipo 3 retratam a demanda pelos setores de varejo originada pelos setores populacionais. Coeficientes do tipo 4 quantificam as relações de trabalho, pois geram a demanda pelos setores

populacionais, a partir do setor básico e dos setores de varejo. Por fim, os coeficientes do tipo 5 quantificam as relações pessoais, entre setores populacionais.

Figura 11 - Coeficientes intersetoriais

	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	(F)
(A)				1		
(B)			2			
(C)						
(D)						
(E)			4			
(F)						

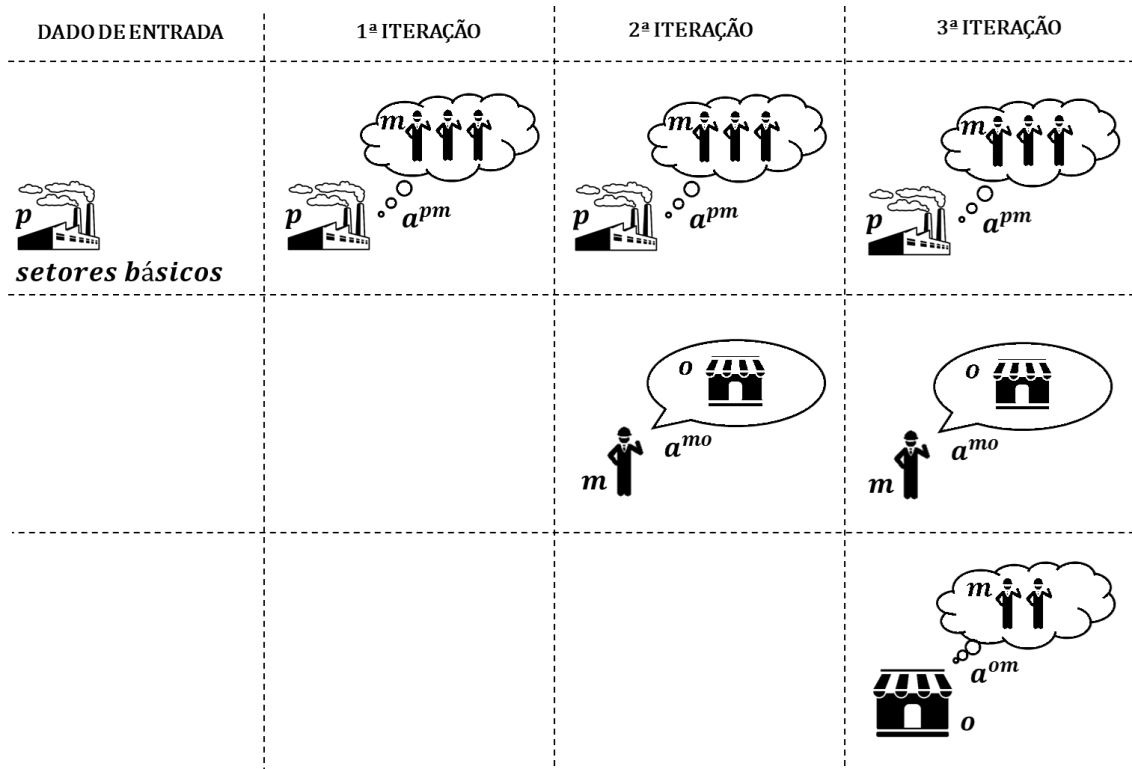
Fonte: Elaborado pelo autor.

Só existem coeficientes técnicos entre setores que possuem seu insumo e produto dentro da área de estudo, entretanto os setores básicos, apesar de não serem consumidos nessa região, consomem insumos nela produzidos. Os setores básicos, também chamados de setores exógenos, são os responsáveis pela geração dos setores induzidos, o que ocorre de maneira iterativa, como pode ser visto na Figura 12. Como dado de entrada, são fornecidas as quantidades dos setores básicos em cada zona de análise, neste caso um setor industrial. Na primeira iteração, esses setores exógenos demandam as atividades de que necessitam. No exemplo, apenas existe uma relação de trabalho com o setor populacional. A relação de trabalho entre o setor industrial “p” e o setor de população “m” é dado pelo coeficiente técnico (a^{pm}).

Na segunda iteração, é recalculada a demanda de pessoas pelo setor industrial. Dessa vez, já se conhece previamente essa quantidade, que, por sua vez, necessitam do setor comercial “o”, relação de consumo dada pelo coeficiente técnico “ a^{mo} ”. Na terceira iteração, o TRANUS simula a demanda e a localização dos três setores; contudo o setor comercial “o” também demandará pessoas “m”, que demandarão mais comércio numa quarta iteração. Este procedimento terá continuidade até que as quantidades demandadas de todos os setores em uma iteração sejam próximas a demanda da interação anterior. O valor final esperado é aquele

utilizado na calibração dos coeficientes técnicos. Sendo assim, a modelagem do subsistema de atividades utiliza uma premissa de equilíbrio, que afirma que todas as atividades produzidas são consumidas na região em estudo, o que pode ser um complicador ao se tentar modelar os indivíduos desempregados, ou os jovens que nem estudam, nem trabalham.

Figura 12 - A modelagem do subsistema de atividades



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os coeficientes técnicos permitem aos analistas diagnosticar as interações entre as diversas atividades. Essa é uma importante contribuição para a interpretação do fenômeno. Caso existam problemas que envolvam dois setores, ele pode diagnosticar essa relação de causa e efeito, permitindo a analistas descartar setores que não interferem no problema e identificar os principais causadores. Entretanto, sua utilidade pode ser expandida para diagnosticar um problema de uso do solo e de transportes. Por exemplo, os problemas de má distribuição espacial das atividades e de distâncias elevadas de viagens, ao identificar as principais atividades de interesse de cada usuário da rede de transportes.

Como visto, a relação entre os setores em distintas zonas é o que gera os fluxos econômicos, medidas de impacto dos subsistemas de uso do solo e de atividades no subsistema de transportes. Os fluxos e os coeficientes têm como base teórica a matriz insumo-produto. Entretanto, na proposta de modelagem do TRANUS, os fluxos econômicos são matrizes

insumo-produto inter-regionais, enquanto os coeficientes técnicos consideram uma abordagem de única região. Dessa forma, assume-se a premissa de que os coeficientes entre dois setores são os mesmos, independentemente da área em que estejam situados. Limita-se assim a aplicação para uma escala regional, onde os coeficientes são distintos, já que a implantação de uma indústria, ou outra atividade comercial, tende a impactar (contratar empregados) nas zonas mais próximas à sua localização.

Por fim, a demanda das atividades não sofre influência de medidas de impacto vindas do subsistema de uso do solo, ou do subsistema de transportes. Dessa forma, a demanda por atividades será sempre a mesma, independentemente das condições da rede, ou da separação espacial das atividades. Como visto, não é assim que a representação conceitual trata o subsistema de atividades. Como é um subsistema do fenômeno urbano, os três modelos conceituais consideram que os transportes e o uso do solo podem impactar na intensidade das relações entre as atividades.

3.3 Modelagem do subsistema de uso de solo

3.3.1 Modelos de demanda

O modelo conceitual do subsistema de uso do solo de Lopes (2015) apresenta a demanda do subsistema de uso do solo sendo influenciada pelo subsistema de transportes, através da “acessibilidade”; pelas atividades, através da “participação das atividades”; e pelo próprio subsistema de uso do solo, através do “valor do espaço”. A demanda por espaço é o resultado da interação entre estes componentes e representa o quanto de solo as atividades desejam consumir em cada uma das zonas.

No TRANUS, existe mais uma classificação para separar os setores. Tudo que foi chamado de setor até este momento foram os representantes das atividades produtivas e da população. Esses tipos de setores são definidos como sendo os setores transportáveis, pois a zona de consumo pode ser distinta da zona de produção. Entretanto, os tipos de solos são também chamados de setores, mas são do tipo não-transportáveis. Duas características são importantes para essa nova classe de setor: primeiro, não consomem nenhum tipo de setor transportável, apenas são consumidos por eles; segundo, o setor transportável só pode consumir o setor não transportável na zona em que se localiza, não sendo permitido que o setor

transportável de uma Zona 1 consoma o setor não transportável de uma Zona 2. Para as decisões que envolvem o subsistema de uso do solo ocorrerem, quatro componentes interagem:

- A demanda por espaço representada pela demanda (D_j^{mn}) de um setor não transportável (n) numa determinada zona (j) por um setor transportável (m);
- A quantidade total de população ou atividades econômicas (X_i^m) de cada setor transportável (m) em cada zona de consumo (i), representando a medida de impacto do subsistema de atividades;
- A acessibilidade, quantificada pelas desutilidades (t_{ij}^m) de deslocamento entre uma zona “i” e uma zona “j” para um setor transportável “m”, representando a medida de impacto do subsistema de transportes;
- E o valor do espaço, composto por duas parcelas: o preço real do solo (p_j^n) e pelo seu preço sombra (h_j^n), representando a medida de desempenho interna ao subsistema de uso do solo.

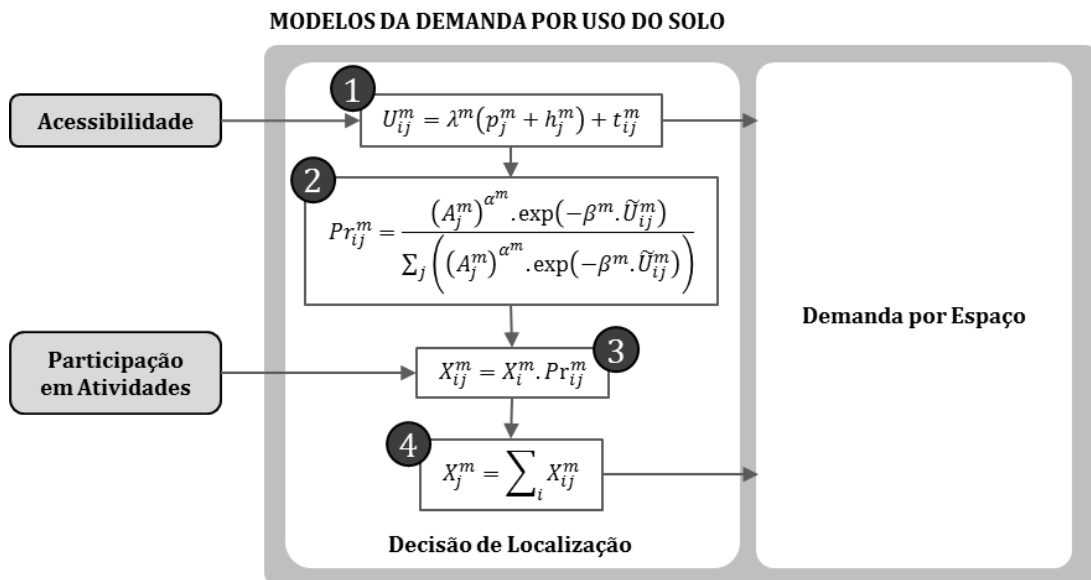
Através da análise dos modelos que utilizam esses componentes, esta fase de modelagem da demanda por solo será subdividida em duas etapas: a decisão de localização das atividades e a demanda por espaço a ser consumido por essas atividades.

O início da modelagem do subsistema de uso do solo é a definição da localização de produção dos setores transportáveis “ X_j^m ”. O modelo utilizado é um logit multinomial (Formulação 2 da Figura 13), que possui como alternativas as diversas zonas onde a atividade pode ser produzida. No modelo logit, três parâmetros fazem parte da sua formulação: o “ A_j^m ”, que é a atratividade de produzir a atividade do setor “m” na zona “j”; o “ α^m ”, que regula a importância entre a atratividade e a função de utilidade para a decisão locacional; e o “ β^m ”, que é a elasticidade de consumo do modelo logit. Apesar de serem parâmetros comportamentais, onde seus significados podem ser facilmente compreendidos como elementos do fenômeno, esses três parâmetros são difíceis de serem avaliados, pois o processo de calibração acaba os modificando apenas para se chegar ao melhor resultado de uma determinada medida de desempenho.

A utilidade (Formulação 1 da Figura 13) utilizada pelo modelo *logit* possui dois componentes: o preço da atividade a ser consumida ($p_j^m + h_j^m$) e a desutilidade de deslocamento (t_{ij}^m) entre a zona de consumo (i) e as prováveis zonas de produção (j), ou seja a acessibilidade. Para regular a importância entre os dois componentes existe no modelo o fator “ λ^m ”. A desutilidade de deslocamento é resultado do modelo de transportes, portanto não é parâmetro de calibração.

O fator de ponderação entre os dois elementos da utilidade é fundamental no processo de dinamicidade, pois a regulagem de importância entre os atributos da decisão locacional é quem definirá a evolução desse subsistema urbano. Um fator alto indica que a população tende a priorizar o custo do solo em sua decisão locacional, o que pode fazer com que ocorra um processo de segregação espacial ao longo do tempo. Já um fator baixo, priorizará o atributo de transportes, fazendo com que a população se concentre próximo a localização das atividades que realiza. No caso de uma cidade com empregos espacialmente concentrados, um fator baixo fará com que a população valorize ficar próximo a essa região, adensando-a.

Figura 13 - Modelos da demanda por solo – decisão de localização das atividades



Fonte: Elaborado pelo autor.

Outros dois elementos são integrantes dessa função de utilidade, o “ p_j^m ”, que é o preço da atividade e que sempre estará relacionada com o preço do solo da região “ p_j^n ”, já que não se quantifica diretamente o valor do setor transportável, apenas dos setores não transportáveis. E o “ h_j^m ”, que é o preço sombra da atividade, que não é dado de entrada, tampouco um parâmetro de calibração. Acaba funcionando como uma medida de ajuste dos modelos de localização. Essa variável é originada através de um processo iterativo, em que a cada novo ciclo é ajustado seu valor para que a quantidade de atividades em cada zona fique similar ao que foi coletado em campo. Numa situação ideal, todos esses valores deveriam ser zero. Assim, a única variável que teria efeito sobre as decisões seriam os preços da atividade (soma de preços de solo) e a acessibilidade. Portanto, um bom conjunto de parâmetros deverá gerar preços sombra baixos. A calibração dificilmente conseguirá zerar essa variável, pois existem outros fatores que

determinam essa decisão locacional, além da acessibilidade e do preço do solo. Sendo assim, o preço sombra será capaz de fornecer indicativos sobre a preferência da população em residir em determinadas áreas. As regiões com preços sombra mais ou menos diferentes da média, indicam que a população escolhe morar (ou realizar outras atividades) nessas áreas por atributos que vão além do preço do solo e da desutilidade de transportes, como segurança, proximidade a diversas atividades, morar próximo ao mar, entre outros fatores.

Da forma que a decisão locacional é modelada no TRANUS, os tomadores de decisão são similares a uma indústria que deseja comprar insumos. O insumo “m” pode vir de diferentes zonas “j”, mas a zona de consumo desse insumo sempre será “i”, pois é onde a indústria está instalada. O conjunto de alternativas dessa decisão é então cada uma das zonas de análise. Neste caso, a premissa de IID, em conjunto com o comportamento esperado de IIA, pode ser violado, pois zonas vizinhas podem possuir atributos similares. Dessa forma, a definição das zonas de tráfego deverá garantir que as zonas sejam as mais distintas possível, uma vez que não existe um modelo aninhado para relaxar essa premissa.

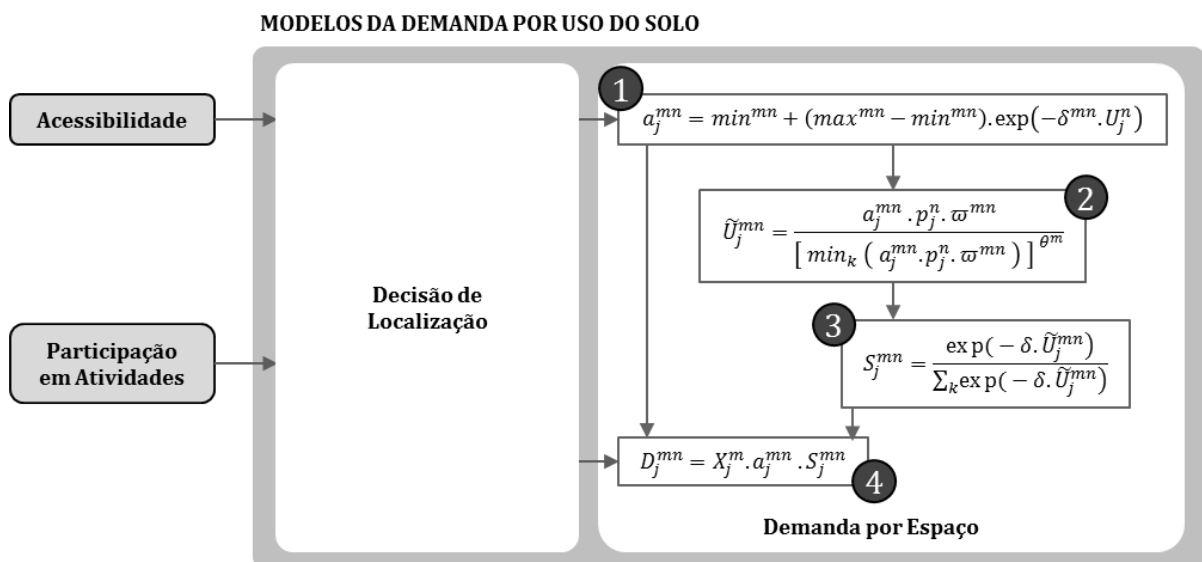
A partir do modelo *logit* são obtidas as probabilidades (Pr_{ij}^m) de que cada setor “m” consumido na zona “i” seja produzido na zona “j”. Desta forma, a demanda por setores transportáveis do tipo “m” em “i” (X_i^m) pode localizar suas zonas de produção “j”. A simples multiplicação (Formulação 3 da Figura 13) das atividades com a probabilidade resulta na quantidade de produção (X_{ij}^m) do setor “m” na zona “j”, que é consumida em “i”. Através de um somatório em “i” (Formulação 4 da Figura 13) é possível encontrar toda a produção do setor “m” que ocorre em “j”, ou seja “ X_j^m ”.

Uma vez conhecida a quantidade de setores transportáveis em cada zona, parte-se para a segunda etapa desse processo de alocação do uso do solo, que é a modelagem da demanda por espaço. Essa segunda etapa será subdividida em duas subetapas: a primeira relacionada com a quantidade de solo consumida pelos setores transportáveis; e a segunda com a definição do tipo de solo a ser consumido.

A quantidade de solo é definida a partir do modelo elástico da Formulação 1 da Figura 14, que é a curva de demanda por solo. Neste caso, define-se a quantidade de solo (a_j^{mn}) de certo tipo “n”, a ser consumido por cada unidade do setor transportável “m” em cada uma das zonas “j”. Tal modelo é dependente da desutilidade de consumo de cada tipo de solo (U_j^n). Essa desutilidade é obtida a partir da remoção do parâmetro da desutilidade de transportes (t_{ij}^m), pois o solo possui localização fixa, da função utilidade da Formulação 1 da Figura 13.

Dois termos são independentes na construção da desutilidade de consumo, ambos são responsáveis pela formação do preço do solo em cada zona. O primeiro é o “ p_j^n ”, que é a parcela do preço de aluguel do solo. Esta parcela sofrerá modificação apenas nos cenários de intervenção, mas, no cenário base, onde a calibração ocorre, ela não se modifica e deve ser tratada como dado de entrada. A segunda parcela é o preço sombra, o “ h_j^n ”, que, como visto, é uma medida de ajuste do modelo. Neste caso, o preço sombra regulará a preferência pelos diversos tipo de solo em uma mesma área, de tal forma que o consumo de solo por cada tipo possa ser similar ao que foi coletado. Sendo assim, o preço sombra dos diversos tipos de solo podem também ser utilizados para compreender o fenômeno modelado, permitindo assim identificar fatores que vão além do próprio preço para definir o quanto de solo será consumido.

Figura 14 - Modelos da demanda por solo – demanda por espaço



Fonte: Elaborado pelo autor.

Entre os termos que compõem a função elástica, ainda precisam ser calibrados o consumo mínimo (\min^{mn}) e máximo (\max^{mn}) de solo “n” por um setor transportável “m” e a elasticidade do consumo (δ^{mn}). Quando calibrados, esses parâmetros podem servir também para a interpretação do fenômeno. Por exemplo, é esperado que a elasticidade de consumo de um setor populacional de baixa renda, seja maior do que a elasticidade de um setor populacional de alta renda, já que esse primeiro grupo é mais suscetível a variação do preço; entretanto, existem outros tipos de relações onde a comparação não é trivial, por exemplo a comparação das elasticidades entre um setor de empregos comerciais e um setor de empregos de serviços. Nestes casos, os valores calibrados serão responsáveis por indicar como esses setores se

comportam. Além disso, como essa é uma análise interna ao subsistema de uso do solo, ela permite o diagnóstico de problemas desse subsistema, por exemplo a relação entre altos preços de solo e a segregação espacial.

Na segunda decisão, a do tipo de solo a ser consumido, é utilizada a teoria de escolha discreta e a teoria econômica dos substitutos. Neste modelo, as alternativas de escolha são os tipos de solo “n” e os tomadores de decisão são cada uma das unidades do setor transportável “m”. A utilidade (Formulação 2 da Figura 14) é função do custo que cada unidade de “m” possui para consumir o solo “n”, deixando evidente o impacto da medida de desempenho do subsistema de uso do solo. Também entra nessa função, o resultado da Formulação 1 da Figura 14, o fator de penalização “ ω^{mn} ” e o parâmetro de escala “ θ^m ” para definir o nível de importância da menor utilidade. O fator de penalização regulará a preferência que cada setor possui em consumir cada tipo de solo. Sendo assim pode ser útil ao processo de compreensão da problemática para quantificar essa preferência, permitindo que os tomadores de decisão delineiem estratégias de desenvolvimento da oferta do tipo de solo específico para atender a determinada população. Por exemplo, se o solo do tipo “edifícios com mais de 10 andares” for muito penalizado pela população de baixa renda, de nada adiantará incentivar imobiliárias e construtoras a criar altos edifícios para solucionar o problema de déficit habitacional da população mais carente.

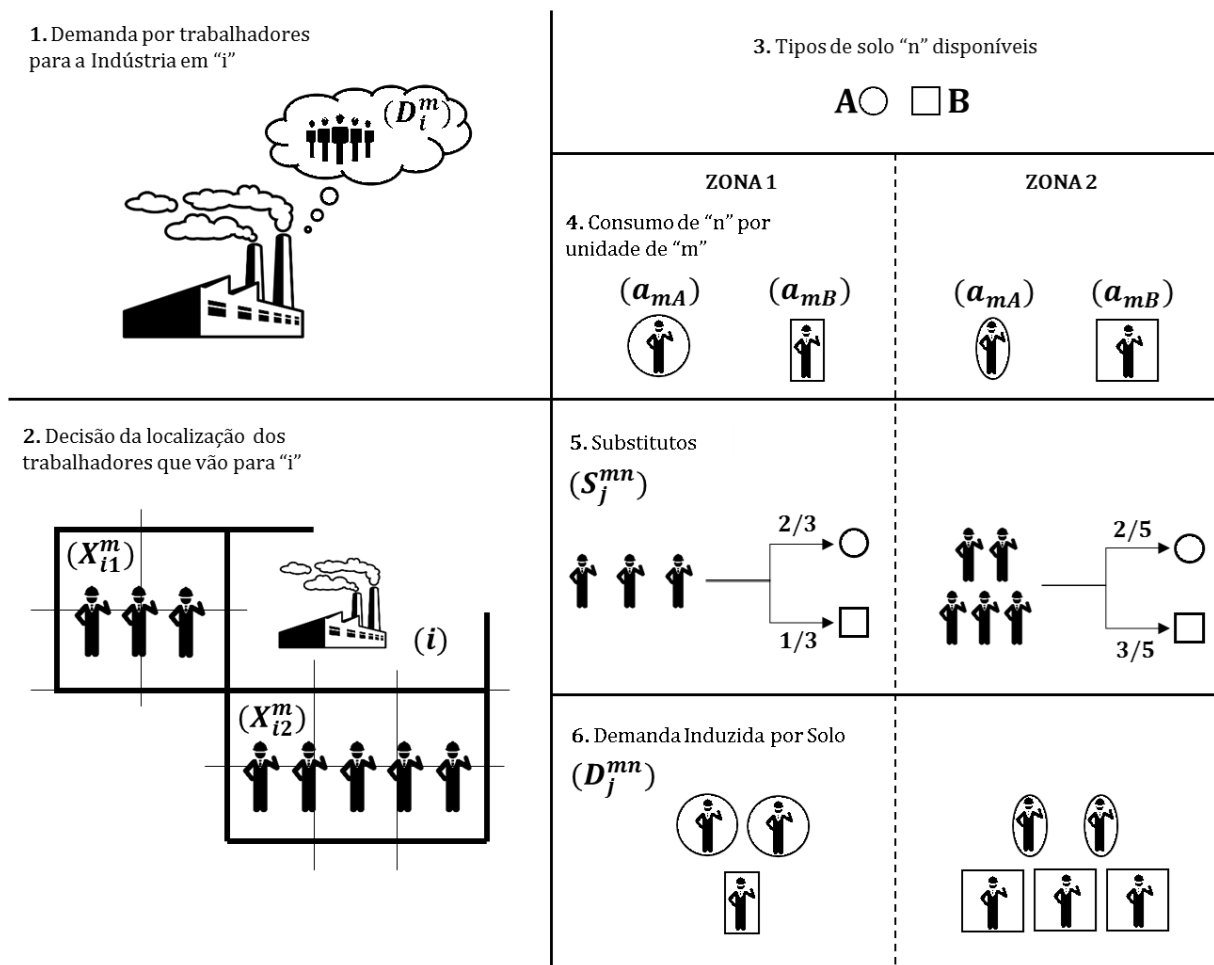
A desutilidade de consumo “ \tilde{U}_j^{mn} ” (Formulação 2 da Figura 14) é utilizada como utilidade no cálculo de probabilidades chamadas de “substitutos” (Formulação 3 da Figura 14), obtidas por meio de um modelo *logit* multinomial. Na economia, o termo “substituto” é utilizado para designar um produto que pode ser consumido em substituição, sendo o modelo *logit* capaz de considerar essa relação de substituição entre alternativas (Berry, 1994). A modelagem deste conceito permite prever o comportamento dos consumidores frente às modificações no mercado, neste caso, o mercado imobiliário. A probabilidade “ S_j^{mn} ” indica o percentual do setor “m” que irá consumir solo do tipo “n”. Mais uma vez existe um parâmetro de elasticidade em um modelo *logit*, que pouco nos ajuda a compreender o fenômeno, por conta da sua dificuldade de interpretação.

Portanto, através dos modelos de decisão locacional descritos acima é possível obter a quantidade “ X_j^m ” do setor “m” produzido em “j”, a quantidade “ a_j^{mn} ” de solo do tipo “n” que cada unidade do setor “m” consome e a proporção “ S_j^{mn} ” de “m” que irá consumir o solo do tipo “n” na zona “j”, dadas certas condições de custos de solo e de deslocamento. O resultado da multiplicação (Equação 4 da Figura 14) dessas três variáveis para cada par de setor “m” e

tipo de solo “n” é a demanda de cada tipo de solo em cada zona, ou a demanda induzida por espaço (D_j^{mn}).

A Figura 15 esquematiza a modelagem detalhada anteriormente. O exemplo serve como uma continuidade da 1ª Iteração da Figura 13. Ressalta-se que a cada interação do modelo de atividades são executados os modelos de uso do solo em simultâneo. A separação utilizada neste texto tem caráter didático. Todo o processo começa a partir da necessidade de localizar a produção de um determinado setor “m” em uma das zonas disponíveis (passos 1 e 2). Em seguida, através da disponibilidade de tipos de solo (passo 3) e da quantidade de solo que cada unidade do setor transportável consome (passo 4) é possível calcular a proporção do setor que irá consumir cada tipo de solo (passo 5). Por fim, infere-se a quantidade demandada de cada tipo de solo (6).

Figura 15 - A demanda do subsistema de uso do solo



Fonte: Elaborado pelo autor.

Pelos modelos de demanda de uso do solo, percebe-se que o TRANUS falha em modelar a alteração da localização das atividades. Apesar de permitir que isso aconteça, não existe um modelo específico que trate dessa decisão. Esse fenômeno é considerado como uma decisão locacional em que os mesmos atores precisam decidir se mantém sua localização ou se mudam a cada novo cenário, levando em conta apenas alterações no subsistema de transportes e de uso do solo. Portanto, o modelo falhará em modelar as decisões de realocação que resultem de alterações no subsistema de atividades, como é o caso da realocação por conta de modificações da composição familiar, frequente entre a população mais jovem e também entre a população mais velha (Clark e Onaka, 1983).

Assim como a realocação dos atuais residentes, os novos residentes também são localizados de acordo com o preço do solo e a desutilidade de transportes; entretanto, diversos outros fatores que podem influenciar nessa decisão não são considerados na modelagem, tais como o tamanho da família, o número de trabalhadores e o número de veículos (Hurtubia, Gallay e Bierlaire, 2010). Incorporar todos os elementos em uma modelagem seria incompatível com o próprio conceito de modelo, como uma simplificação da realidade. Entretanto isso não dispensa os analistas de criarem setores transportáveis que façam jus as premissas existentes no modelo e de ao realizarem conclusões que considerem as limitações do modelo.

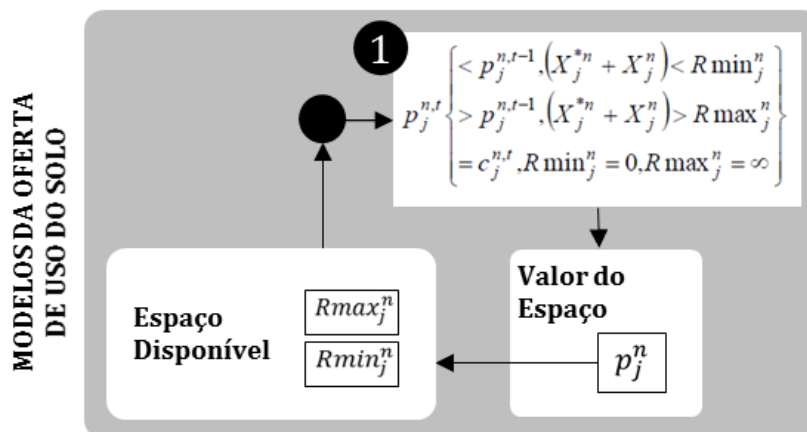
3.3.2 Modelos de oferta

A oferta do subsistema de uso do solo é apresentada como o espaço organizado limitado pelo solo disponível para ser ocupado ($Rmin_j^n$ e $Rmax_j^n$). Esse elemento possui limitações impostas pelo poder público, assim como pelo mercado da construção civil, que é o principal responsável por prover o espaço disponível na maioria das cidades. Quando o espaço disponível é solicitado pelos setores, ocorre um efeito no valor do solo que pode aumentar ou diminuir, a depender das condições do mercado (Formulação 1 da Figura 16). O espaço organizado é representado no TRANUS pelas quantidades máximas e mínimas disponíveis para ocupação. A capacidade mínima é necessária para regular as mudanças de tipo de solo ao longo do tempo, enquanto o limite máximo regula a disponibilidade de solo que o mercado da construção civil e as regulamentações da região conseguem fornecer a cada cenário.

Com essas capacidades definidas, o TRANUS atuará de maneira iterativa: sempre que a demanda por um tipo de solo em uma região for maior do que a capacidade máxima, o modelo irá elevar o preço daquele solo, reduzindo assim sua demanda; caso a demanda seja menor do que a capacidade mínima, o preço do solo será reduzido para que a demanda por ele aumente.

A variável modificada pelo modelo de oferta varia a depender do cenário em análise. No cenário base, esse procedimento é realizado no preço sombra (h_j^n), o que ajudará na etapa de calibração do modelo. Para os demais cenários, o preço sombra se mantém constante e atua apenas como um indicador da preferência dos setores por determinada zona, recaindo sobre o preço real do solo (p_j^n) a função de ser modificado até que os limites sejam satisfeitos. Este processo iterativo continua até que o preço e a produção de cada tipo de solo sejam similares ao da iteração anterior e os limites de espaço sejam satisfeitos. Por essa interação entre demanda e oferta, em que a demanda se ajusta para ser adequada aos limites da oferta, é que a modelagem do subsistema de uso do solo foi considerada em equilíbrio.

Figura 16 - Modelos da oferta do uso do solo



Fonte: Elaborado pelo autor.

Apesar de ter sido aqui tratado do consumo de solo, esse mesmo procedimento é aplicado para a definição da localização de atividades. Nesse caso, os limites a serem fornecidos são as quantidades mínimas e máximas de cada setor que podem existir em determinada zona. E os preços das atividades é que são ajustados e não os preços do uso do solo. Vale lembrar que tudo isso ocorre de maneira iterativa e completa em cada iteração, então a cada nova interação a localização das atividades e a quantidade de solo consumido vão se alterando até que as restrições de solo e de atividades sejam atendidas.

Percebe-se que o TRANUS não é capaz de simular as decisões da oferta do uso do solo. Sendo assim, os modelos e variáveis presentes neste componente atuam apenas para representar os elementos da oferta e não para simular as decisões. Atualmente existem modelos de desenvolvimento urbano capazes de prever o comportamento de construtoras e imobiliárias, que atuam modificando a oferta de solo disponível. Diferentemente, da oferta de transporte,

onde a atuação na malha viária e na oferta de serviços de transportes é, em geral, de responsabilidade do Estado, ato este que gera a necessidade de modelagem; a oferta do uso do solo possui uma participação muito maior dos atores de desenvolvimento da oferta e o Estado regula índices de construção, como se estivesse definindo os mínimos e os máximos utilizados pelo modelo. Nesse cenário, o modelo falha em representar as decisões de alguns atores pertencentes ao fenômeno urbano, em especial aqueles que atuam diretamente na modificação da oferta do subsistema de uso do solo. Limita-se assim a capacidade do modelo em auxiliar na compreensão dos motivos utilizados por esses atores para expandiram suas atividades em determinadas regiões, enquanto abdicam de se desenvolverem em outras regiões.

3.4 Modelagem do subsistema de transportes

3.4.1 Modelos de demanda

A demanda por transportes é o resultado da modelagem das decisões de viagens. Tais decisões são influenciadas pelo subsistema de uso do solo, através da distribuição espacial dos usos e das atividades, e pelo próprio subsistema de transportes, através do nível de serviço da rede. Nos modelos de transportes, os tipos de viagens por categorias de indivíduos são denominados de categorias de transporte e sua unidade é a quantidade de viagens para o período de tempo da análise do subsistema de transportes. As categorias de transportes estão diretamente relacionadas com as relações entre os setores transportáveis.

Relações do tipo trabalho gerarão categorias de viagens que representam os deslocamentos entre a zona de domicílio de um indivíduo e sua respectiva zona de emprego. Categorias com essa função serão chamadas de categorias de viagens do tipo trabalho. As relações de consumo gerarão viagens para consumir produtos e serviços dos setores de atividades produtivas. Quando as atividades produtivas forem produtoras de bens, como o setor comercial ou industrial, essas relações de consumo serão para a realização de compras, portanto as categorias de viagens que as representam podem ser do tipo compras, muitas vezes classificadas como viagens do tipo outros. Quando a atividade produtiva for o setor educacional, então a relação de consumo ocorrerá para consumir a oferta de educação do setor permitindo assim classificar esse deslocamento como viagens motivo educação. Outras relações poderão gerar tipos distintos de categorias de viagens. Além disso, cada tipo de viagem pode

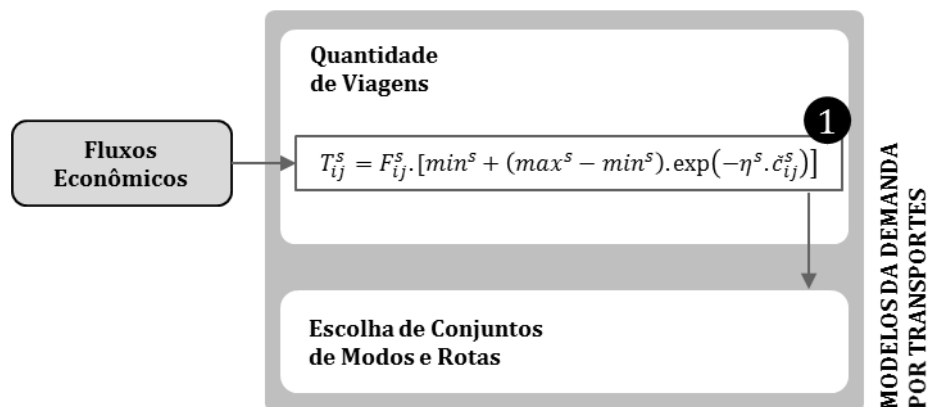
ser subdivido para grupos socioeconômicos, já que os setores transportáveis populacionais podem ser subdivididos por diversas classes populacionais.

Os elementos responsáveis pela demanda por transportes foram identificados no TRANUS como sendo:

- As decisões de viagens, ou a demanda por transportes, que podem ser interpretadas como a variável quantidade de viagens “ T_{ij}^{ks} ” da categoria de viagens “s”, que utiliza um conjunto de modos “k”, passando pelo caminho “p” para ir de uma origem “i” a um destino “j”;
- A interação espacial entre as atividades, representada pela variável “ F_{ij}^s ”, ou fluxos econômicos, representando a medida de impacto dos subsistemas de atividades e de uso do solo.
- E o custo generalizado “ \tilde{c}_{ijp}^{ks} ”, que é o indicador do nível de serviço da rede, representando a medida de desempenho do subsistema de transportes.

Conhecidas as variáveis que participam da modelagem das decisões da demanda do subsistema de transportes, investigaram-se os modelos que as utilizam. Eles são apresentados na Figura 17. Constatou-se que esta modelagem ocorre em duas etapas. A primeira é a definição da quantidade de viagens. A segunda, a modelagem do conjunto de modos e rotas utilizados.

Figura 17 - Modelos da demanda por transportes – quantidade de viagens



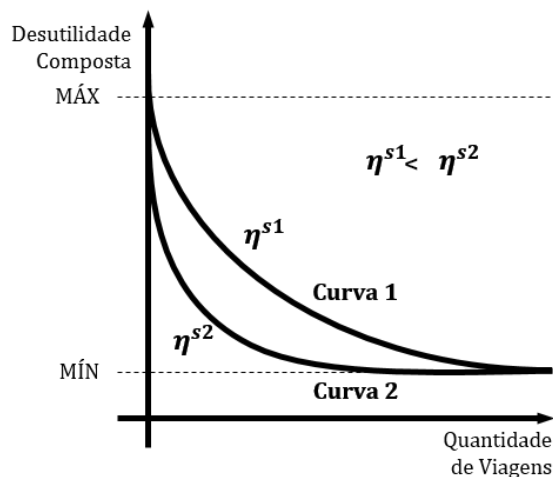
Fonte: Elaborado pelo autor.

Para modelar a quantidade de viagens utiliza-se um modelo elástico (Formulação 1, da Figura 17), que transforma os fluxos econômicos em quantidade de viagens e é dependente do custo composto, ou desutilidade composta, “ \tilde{c}_{ij}^s ” das viagens da categoria “s” viajando de “i” para “j”. Desta forma, mesmo pares origem-destino com elevada quantidade de fluxos

econômicos poderão ter baixa quantidade de viagens, se a desutilidade composta de transporte for elevada.

Na curva de demanda, a elasticidade (η^s) é a responsável pela curvatura da função, ou seja, indica o quão sensível a categoria de viagens é ao aumento de uma unidade da desutilidade composta. Enquanto as variáveis “ v_{min}^s ” e “ v_{max}^s ” representam, respectivamente, os limites mínimos e máximos de quantidade de viagens que podem ser geradas por unidade de fluxo econômico. O impacto da elasticidade no modelo pode ser verificado na Figura 18. Mesmo as curvas 1 e 2 possuindo os mesmos extremos, a categoria com Curva 2 sempre realiza menor ou igual quantidade de viagens que a categoria da Curva 1.

Figura 18 - Curva de demanda por transportes - função elástica



Fonte: Elaborado pelo autor.

Dessa forma, as elasticidades podem ser úteis à compreensão da problemática, a partir da comparação desses parâmetros das diversas categorias de transportes. Alguns resultados são esperados, como a elasticidade de pessoas de renda menor, ser maior do que a elasticidade de pessoas de renda mais elevada. Tais resultados podem ser utilizados para validar o processo de calibração. Entretanto outras relações podem não ser assim tão evidentes, dessa forma, a calibração desse parâmetro auxiliará a compreender essas diferenças. Essa curva pode também ser utilizada no diagnóstico de problemas internos ao subsistema de transportes, pois relaciona elementos de mobilidade (quantidade de viagens), com elementos do nível de serviço desse subsistema (desutilidade composta).

Segundo (Litman e Steele, 2007), diversas características podem influenciar a curva de demanda, como fatores demográficos e socioeconômicos da população, atividade econômica,

estratégias de gerenciamento da demanda, opções de transporte, padrões geográficos e de uso do solo, além dos custos de se locomover. Os dois primeiros fatores só poderão ser considerados no TRANUS através da subdivisão das categorias de transportes, ou seja, criar curvas de demanda específicas. Os demais, ou pelo menos algumas características deles, estão incorporados no parâmetro de desutilidade composta “ \tilde{c}_{ij}^S ”, entretanto não é possível adicionar atributos que influenciem na demanda como, por exemplo, a percepção de segurança ou conforto.

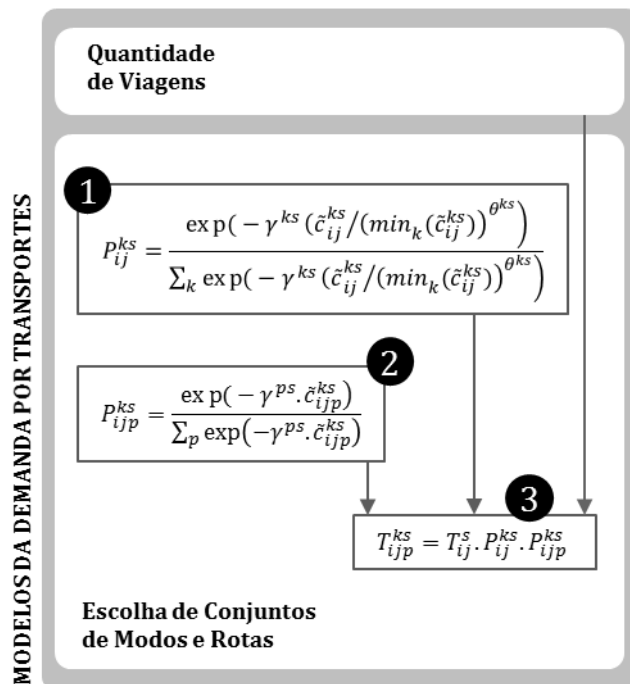
Entre os elementos que compõem o custo generalizado, elemento base na desutilidade composta, estão presentes o valor do tempo de viagem e o valor do tempo de espera. Apesar de serem elementos essenciais em processos de avaliação de alternativas de intervenções de transportes, inclusive recomendado pelo Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID) em seu manual de avaliação econômica de projetos (Mendoza, Cruz e Méndez, 2006), os valores do tempo são alvos de críticas por orientar as intervenções para a redução do tempo de viagem e de beneficiar a população que possui um valor de tempo mais elevado, priorizando assim soluções voltadas para o transporte motorizado individual. No paradigma atual de planejamento, onde as preocupações do processo de planejamento saem do escopo dos transportes e permeiam questões ambientais e de segurança viária, o argumento da redução do tempo de viagem não mais se sustenta (Banister, 2008). Além disso, não há nenhuma razão para que o valor que o indivíduo está disposto a pagar para reduzir seu tempo de viagem seja igual ao que a sociedade atribui à redistribuição das atividades dos indivíduos (Mackie, Jara-Díaz e Fowkes, 2001). Sendo assim, a presença do valor do tempo na função de utilidade pode resultar na seleção de intervenções que sejam controversas aos novos paradigmas de planejamento.

Como visto, a desutilidade composta “ \tilde{c}_{ij}^S ” representa também a medida de impacto de acessibilidade. Sendo assim, a abordagem conceitual do modelo TRANUS se utiliza do mesmo indicador para representar tanto a medida de impacto de acessibilidade, quanto a medida de desempenho do subsistema de transportes. Tal abordagem difere das representações conceituais, onde a medida de desempenho possui conceito da medida de impacto, como tempo ou custo do deslocamento. Ao se utilizar a mesma medida, perde-se a capacidade de compreender quais atributos poderiam impactar mais ou menos as decisões que delas se utilizam.

A segunda parte da modelagem da demanda por transportes, que é a definição das rotas e dos conjuntos de modos, utiliza a teoria de escolha discreta, especificamente os modelos

aninhados *logit* multinomiais. Já foi detalhado o funcionamento desses modelos e as utilidades utilizadas na sessão 3.1.1. Como visto, a decisão composta do TRANUS é a escolha entre os conjuntos de modos “k” e utiliza a desutilidade composta “ \tilde{c}_{ij}^{ks} ” em um modelo *logit* multinomial (Formulação 1 da Figura 19). Enquanto a decisão elementar, a escolha de rotas “p” de um conjunto de modos “k”, utiliza a desutilidade “ \tilde{c}_{ijp}^{ks} ” em um segundo modelo *logit* (Formulação 2 da Figura 19). Nessas equações, existem parâmetros de escala (θ), que definem a importância do menor valor; e a elasticidade das decisões (γ), que modificam a decisão a partir da mudança de uma unidade da desutilidade composta, ambos necessitam ser calibrados. Entretanto, representam conceitos abstratos para que sua contribuição à compreensão do fenômeno possa ser relevante.

Figura 19 - Modelos da demanda por transportes – escolha de conjuntos de modos e rotas



Fonte: Elaborado pelo autor.

A escolha discreta clássica, como é aplicada no TRANUS, assume racionalidade dos tomadores de decisão e perfeita informação do conjunto de alternativas (Acheampong e Silva, 2015), premissas essas que inserem o tomador de decisão numa condição de certeza. Entretanto, as decisões do subsistema de transporte são inerentemente realizadas sob condições de incertezas (Rasouli e Timmermans, 2014). Quando saem de casa, os indivíduos não estão certos sobre seus horários de chegada ao destino. Quando optam por se locomover com o transporte público não sabem se existirá um assento para eles. Ainda assim, modelos tradicionais de

escolha discreta são os mais utilizados para a modelagem de transportes, enquanto modelos em condições de incerteza são ainda incipientes.

Apesar de existir uma certa dificuldade em definir quais conjuntos de modos são mais adequados em cada análise, a aplicação do modelo aninhado *logit* multinomial relaxa a premissa de IID para a escolha entre duas alternativas que pertençam a um mesmo subconjunto. Entretanto, no segundo nível de decisão, a construção das rotas permite que uma alternativa compartilhe trechos que também estão presentes em outra rota. É possível inclusive que duas rotas sejam idênticas, sendo que uma utiliza moto e outra carro. Esses são elementos que estão além das similaridades dos modos e que são capturadas pelo modelo aninhado. Dessa forma, recomenda-se uma análise criteriosa do processo de criação de rotas do TRANUS para que as premissas da escolha discreta não sejam violadas na decisão elementar.

Uma terceira crítica à aplicação desses modelos é que os atributos das alternativas já estão pré-definidos, pois são as variáveis do custo generalizado. Apesar de considerar atributos relevantes para as decisões de modo, como o tempo e o custo de deslocamento e de transbordo, esse custo pode ser composto por outros atributos, como: renda do indivíduo, idade, qualidade do transporte, segurança, entre outros. Alguns desses atributos podem ser incorporados através de uma segmentação adequada dos setores transportáveis e das categorias de transportes, entretanto atributos que necessitem de uma modificação na formulação da função de utilidade não poderão ser incorporados.

A partir das probabilidades, as viagens obtidas com o modelo elástico podem ser alocadas na rede. Sendo assim, o que antes eram viagens " T_{ij}^s " entre origens "i" e destinos "j" de cada categoria de transportes "s", transforma-se (Formulação 3 da Figura 19) em viagens " T_{ijp}^{ks} " entre origens e destinos para cada categoria de transportes "s" fazendo uso de determinada rota "p" com o uso de um determinado conjunto de modos "k".

Enquanto os parâmetros dos cálculos de probabilidades não possuem um significado prático para a compreensão do fenômeno, deve-se se dar uma maior atenção aos parâmetros do custo generalizado, ou função de desutilidade. Esses parâmetros podem ser separados em dois tipos: aqueles que penalizam de forma igual os modos para todas as categorias de viagens e funcionam como a constante específica da alternativa de uma função de utilidade (o α_k da Equação 5); e aqueles que penalizam de maneira diferente o modo por cada categoria, uma parte deles está relacionada com os atributos deste custo generalizado, como tempo ou custo (os β_{ks} da Equação 5) e outra parte funciona como uma constante específica da alternativa e da categoria (os γ_{ks} da Equação 5). Vale ressaltar, que a formulação da Equação 5 não está

disponível nos manuais do TRANUS, mas é uma percepção adquirida a partir dos nomes dos parâmetros de calibração e de experimentos controlados para avaliar o impacto dos mesmos.

$$U_{ks} = \alpha_k + \sum \gamma_{ks} + \beta_{ks} * X_{ks} \quad (5)$$

As penalizações do primeiro tipo são um indicador para se compreender quais modos são muito penalizados na área em estudo, sendo os motivos para esta penalização os mais diversos. Um modo que possua velocidade alta e não tenha custo de deslocamento, mas que não seja muito utilizado pela população, precisará ter uma penalização alta para compensar tempos e custos baixos, como pode ser o caso da bicicleta em diversas cidades brasileiras. O carro pode sofrer penalização pelo seu elevado custo de aquisição, o que o faz não estar disponível para toda a população. Já as penalizações do segundo tipo permitem avaliar como cada usuário percebe cada um dos modos e seus respectivos atributos. Essas características podem ser relevantes para compreender as preferências de cada categoria. Por exemplo, se existe um problema de esvaziamento do transporte coletivo, de nada adianta aumentar a velocidade operacional deste modo se a população o penaliza muito. Os exemplos apresentados não tentam esgotar os motivos das penalizações, mas apenas ilustram conclusões que podem ser obtidas a partir desses parâmetros.

Em cada processo de modelagem, esses parâmetros poderão ter os mais diversos significados. Entretanto, deve-se buscar calibrá-los sob uma perspectiva comportamental, já que são indicadores da preferência dos usuários por determinados modos. Por exemplo, é inesperado que um grupo de indivíduos de renda mais alta possua uma penalização menor ao ônibus do que a população de renda mais baixa. Esse tipo de análise pode ser útil no processo de calibração quando esses parâmetros precisam ser definidos. A calibração em si ajudará a definir as diferenças entre essas percepções. No exemplo anterior, só se sabe que a população de renda mais alta deve ser menos penalizada, mas o quanto essa penalização é distinta da população de renda mais baixa apenas a calibração poderá quantificar.

3.4.2 Modelos de oferta

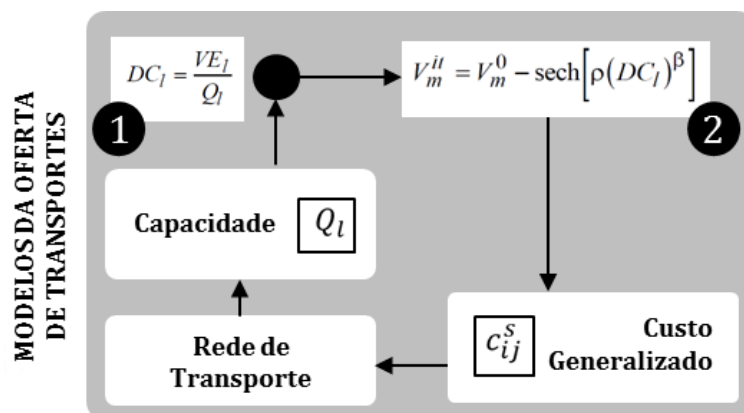
A oferta de transportes é o componente do subsistema de transportes onde as decisões de viagens podem ser alocadas, ou seja, contempla a rede viária e a rede de transporte público da área em estudo. É nesse componente, onde são inseridas as soluções de transporte mais

tradicionais, como a duplicação de uma via e a modificação da frequência de uma linha de transporte público. Quando a demanda interage com a oferta ocorre uma modificação do nível de serviço do subsistema de transportes, que impacta sua própria demanda e também as decisões do subsistema de uso do solo. Dessa descrição, percebe-se que dois elementos estão presentes na modelagem da oferta do subsistema de transportes: a construção da rede de transporte; e o modelo de interação entre demanda e oferta do subsistema de transporte.

No TRANUS, a rede viária é multimodal, onde todos os modos podem simultaneamente utilizar os mesmos segmentos de vias, por isso, cada segmento é composto por dois grupos de características: físicas, relacionadas com a estrutura física da rede, como a capacidade, o tipo específico de cada segmento, direção e nome; e do modo, características operacionais relacionadas a cada modo que o utiliza, como a velocidade em fluxo livre. Todas as alterações dessa etapa devem ser implementadas pelo próprio analista como parte de seu esforço de avaliação de alternativas, ou de construção do cenário base. Também é possível que a oferta de transportes se mantenha constante em todos os cenários e as únicas alterações que ocorrerão no modelo sejam realizadas no subsistema de uso do solo. Esse método dependerá do objetivo da simulação e detalhá-lo foge ao escopo deste trabalho.

Com a rede estabelecida, o modelo verificará se existe capacidade (Q_l) para suprir a demanda (VE_l) (Formulação 1 da Figura 20) e recalculará duas variáveis sempre que a relação se modificar: o tempo de espera para modos com rotas, que se modifica de acordo com a teoria das filas; e a velocidade média para cada segmento, que se altera quando a relação entre volume e capacidade da via se aproxima de um (Formulação 2 da Figura 20).

Figura 20 - Modelos da oferta de transportes



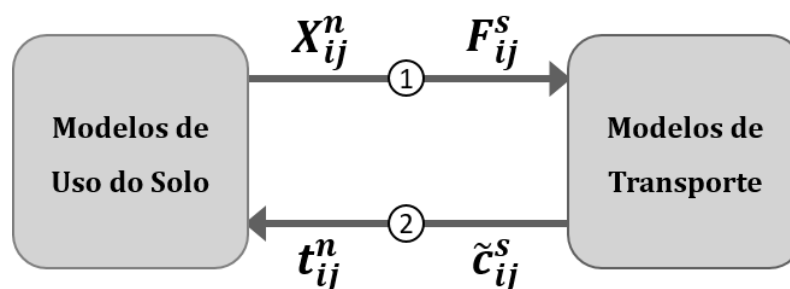
Fonte: Elaborado pelo autor.

A modificação das velocidades, altera o custo generalizado do sistema. Em um processo iterativo, a demanda se ajusta a este novo custo generalizado até que condições de convergência sejam atendidas entre uma simulação e outra. Por conta do ajuste da demanda e a consequente busca por um atendimento da capacidade é que a modelagem de transportes foi considerada em equilíbrio. Apesar disso, esse processo fornece um indicador importante para a compreensão da problemática que é a demanda reprimida por viagens. Essa demanda é obtida ao se subtrair a quantidade de viagens da última interação (quando já há carregamento da rede) da quantidade de viagens da primeira interação (quando a rede não possui carregamento). Pela forma de cálculo, percebe-se que essa é a demanda reprimida pelas condições de transportes, portanto, são indivíduos que deixaram de se deslocar porque o nível de serviço do subsistema de transportes as impediram.

3.5 Modelo de interface

Na seção 3.1 foram apresentados os indicadores de interação dos modelos ao longo do tempo. Entretanto, não se discutiu a unidade da modelagem que deve ser considerada para que ocorra a interação entre os subsistemas. Como visto, os modelos de uso do solo relacionam setores não transportáveis e transportáveis, e os modelos de transportes modelam as relações entre os setores em função das categorias de transportes. Já o foco do subsistema de atividades são relações entre setores transportáveis e não recebe informações de nenhum dos outros dois subsistemas, mas contribui na composição dos fluxos econômicos. As diferenças temporais e de unidades entre os subsistemas fizeram com que fosse criado um modelo de interação, ou “interface”. A Figura 21 retrata as variáveis de relação entre os subsistemas e destaca os dois momentos nos quais as transformações de unidades se fazem necessárias.

Figura 21 - Variáveis de interação dos subsistemas



Fonte: Elaborado pelo autor.

O momento 1 é a transformação da matriz de produção e consumo dos setores transportáveis em fluxos econômicos por categorias de transportes (Equação 6). Enquanto o momento 2 é a modificação da acessibilidade por categoria de transportes em acessibilidade por setor transportável (Equação 7).

$$F_{ij}^s = \sum_n \left(X_{ij}^n \frac{vol^{ns} pc^{ns}}{tiem^{ns}} + X_{ji}^n \frac{vol^{ns} cp^{ns}}{tiem^{ns}} \right) \quad (6)$$

$$t_{ij}^n = \tilde{c}_{ij}^s * pc^{ns} * tiem^{ns} + \tilde{c}_{ji}^s * cp^{ns} * tiem^{ns} \quad (7)$$

Esses modelos de interação possuem 4 variáveis:

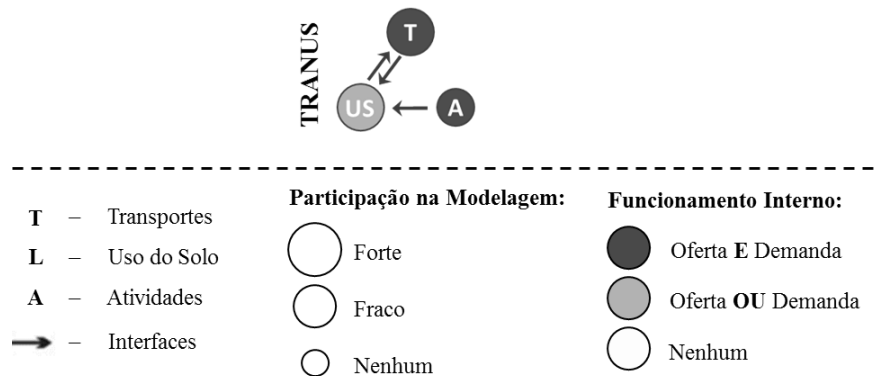
- Duas para transformar o sentido do fluxo (pc^{ns} e cp^{ns}), pois no subsistema de atividades e de uso do solo o fluxo sempre estará no sentido da demanda para a produção; o que nem sempre é o mesmo que origem e destino, pois dependerá do horário modelado no subsistema de transportes e do tipo de setor deslocado;
- Uma variável responsável por transformar a unidade do subsistema de atividades em unidades de transportes (vol^{ns}), que é muito útil na modelagem de cargas, onde as atividades são medidas em produtos, mas o subsistema de transportes utiliza veículos. Neste caso, o parâmetro pode ser entendido como uma relação de produtos por veículo;
- E a variável fator de tempo ($tiem^{ns}$), que relaciona o tempo modelado no subsistema de transportes, como a hora de pico, com o tempo do subsistema de atividades, como o mês.

Essas variáveis são obtidas por um processo de coleta de dados e trazem consigo informações importantes para a compreensão do padrão de deslocamentos da cidade. Por exemplo, a quantidade de viagens por intervalo de tempo, ao longo de todo um dia, obtida pela variável “ $tiem^{ns}$ ”. Ou ainda a possibilidade de observar quais os motivos dos deslocamentos ao longo do dia, quantas pessoas retornam do trabalho e quantas estão indo durante o mesmo intervalo de tempo, por meio de pc^{ns} e cp^{ns} . Compreender esses padrões pode ser útil na definição do período para as quais as intervenções de solução irão atuar.

3.6 Considerações finais

Nos tópicos anteriores, foram discutidos todos os modelos que juntos representam o fenômeno urbano. A partir disso, foi possível verificar que o TRANUS consegue modelar as decisões de demanda do subsistema de transportes e de uso do solo, os elementos presentes na oferta desses dois subsistemas e suas respectivas interações. Observou-se ainda que as decisões dos indivíduos são simuladas a partir da teoria de escolha discreta e as relações entre os setores transportáveis por meio de análises insumo-produto. Já o subsistema de atividades é minimamente modelado, não reconhece medidas de impacto dos demais subsistemas, mas é capaz de influenciar o subsistema de uso do solo. Essas análises corroboram com a análise do modelo realizada no Capítulo 2 e cuja representação é rerepresentada pela Figura 22.

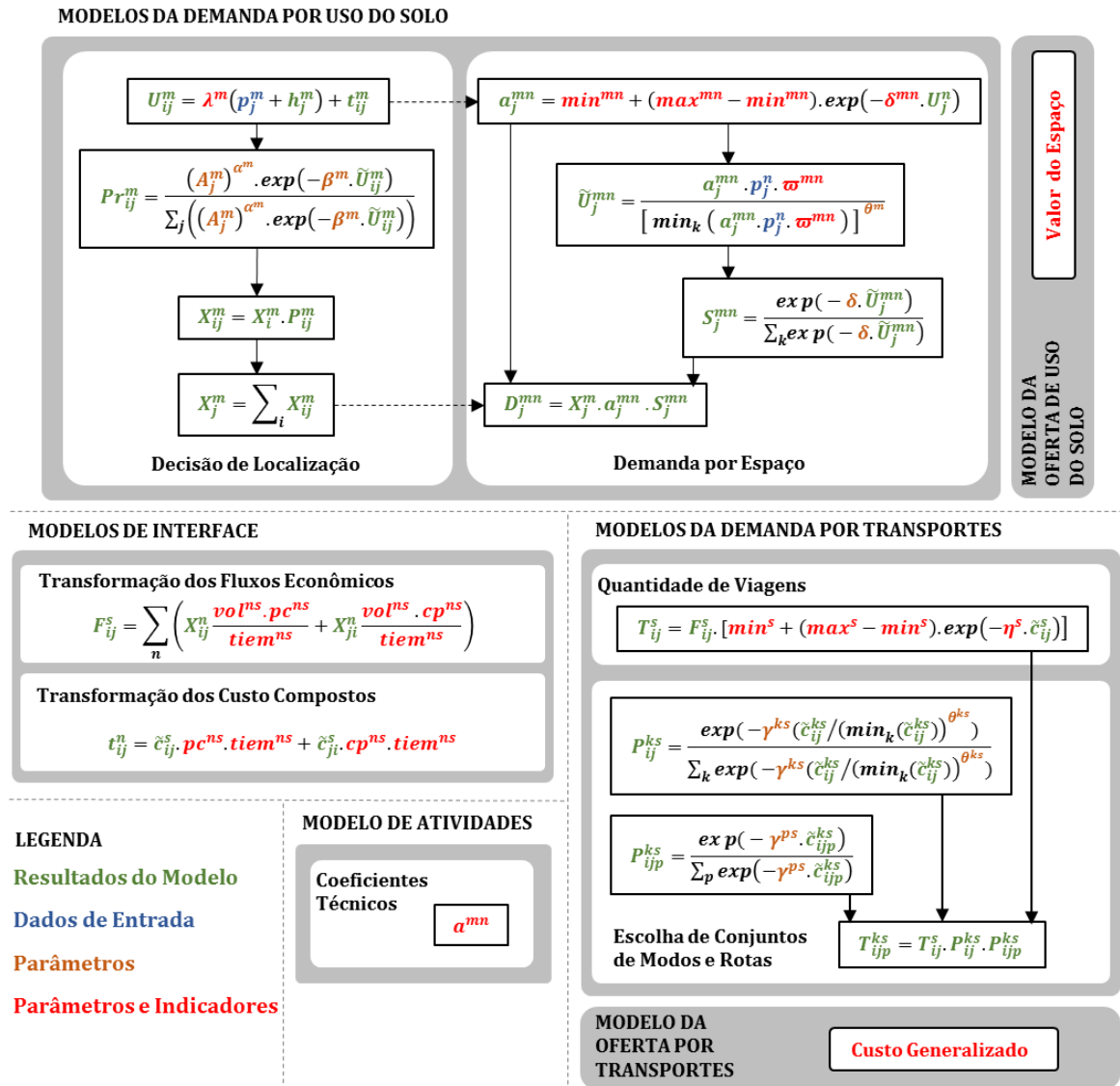
Figura 22 - Representação conceitual do modelo TRANUS



Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise deste capítulo identificou os parâmetros de calibração, onde foram destacados aqueles capazes de contribuir para o entendimento do fenômeno e estão representados em vermelho na Figura 23. Tais parâmetros deverão ser os elementos norteadores do processo de calibração, como será discutido no Capítulo 4. A Figura 23 relaciona os modelos e as etapas do fenômeno e trata ainda de representar como ocorrem as interações entre os subsistemas. Observa-se que os modelos de oferta são apenas variáveis que tratam das capacidades permitidas, ou do resultado da interação entre a demanda e a oferta de cada subsistema, enquanto os modelos de demanda são compostos por diversas equações que simulam as decisões de cada subsistema.

Figura 23 - Classificação das variáveis



Fonte: Elaborado pelo autor.

4 PROPOSTA METODOLÓGICA DE CALIBRAÇÃO DO TRANUS

No capítulo anterior, foram identificados os parâmetros que podem ser considerados indicadores da problemática urbana. Sendo assim, são capazes de auxiliar no processo de compreensão da problemática, mas antes que sejam utilizados com esta finalidade precisam passar por um processo de calibração. Calibrar um modelo é o processo pelo qual os parâmetros são estimados (Bonnel *et al.*, 2014). Por sua vez, a estimativa envolve encontrar os valores dos parâmetros que tornam os dados observados mais prováveis sob a especificação do modelo; neste caso, um ou mais parâmetros podem ser julgados não significativos e deixados de fora do modelo (Ortúzar e Willumsen, 2011).

Por conta disso, este capítulo trata do terceiro objetivo específico: Desenvolver uma proposta metodológica de calibração dos parâmetros identificados como potenciais indicadores, contribuindo para as análises de alternativas de intervenção que compõem o processo de planejamento urbano integrado. Inicialmente será apresentada e criticada a metodologia de calibração do TRANUS proposta por manuais e aplicadas em situações reais de calibração (seção 4.1). A partir dessa revisão e com o auxílio do detalhamento dos modelos realizado no capítulo anterior, será discutida uma proposta metodológica de calibração (seção 4.2). Essa proposta irá abordar aspectos da calibração em si, ou seja, como se estimar os valores dos parâmetros; e focará também na proposição de métodos para que alguns parâmetros possam ser utilizados na compreensão da problemática.

4.1 Calibração convencional

Uma das primeiras decisões a ser realizada no processo de calibração diz respeito ao zoneamento da análise, ou seja, qual a delimitação da região da análise e como ela será subdividida. Um dos manuais do TRANUS (Barra, 2014) descreve como devem ser definidas as zonas. Reconhecendo que o número de zonas possui efeito sobre todo o processo de modelagem, o manual vai contra o senso comum de que quanto maior a quantidade de zonas, melhor o modelo. Segundo ele, os resultados dependem também da qualidade da informação disponível. Como exemplo, cita que informações demográficas geralmente são encontradas em unidades de áreas pequenas, pois geralmente veem de dados censitários; entretanto os empregos e os números de viagens entre as zonas são informações menos precisas. O manual não define uma regra para a quantidade de zonas, pois esse detalhamento depende diretamente do propósito

do estudo, mas cita que um modelo urbano possui na ordem de 100 zonas por milhão de habitantes. Em aplicações urbanas, essas zonas são menores nas regiões mais adensadas. No TRANUS, não existe a necessidade de homogeneidade de setores entre as zonas, inclusive uma zona pode possuir apenas um tipo deles. Entretanto, a homogeneidade deve ser verificada internamente a cada zona quanto a oferta de transportes.

No TRANUS, as subdivisões ocorrem também quanto as atividades, ou seja, é necessário definir quantos e quais setores serão utilizados. Esses setores são definidos de acordo com a aplicação que se deseja, assim como as unidades mais convenientes para representa-los. Isto torna possível uma adaptação do modelo para aplicações urbanas e regionais, assim como o permite incorporar peculiaridades da cultura local. A maioria das aplicações dividem a população em pelo menos três grupos socioeconômicos e os setores das atividades produtivas são subdividas em três ou quatro tipos (Barra, 2014). Como exemplo, a aplicação de Belo Horizonte dividiu a população em três setores de acordo com a renda dos domicílios; e os setores das atividades em cinco tipos de atividades: educacional, governamental, industrial, saúde e serviços (Werneck, 2015).

Uma terceira decisão deste processo diz respeito a representação temporal de cada subsistema. Alguns dados de entrada dependem diretamente do período de simulação considerado, por exemplo: a frequência média das rotas de transporte público, a capacidade total das vias e os preços de aluguel de solo, por exemplo. Isso faz com que todos os resultados do modelo estejam na mesma unidade temporal desses dados de entrada. É comum que os modelos de uso do solo (e de atividades) sejam representados em uma escala temporal distinta do modelo de transportes. Em uma aplicação urbana, unidades mensais são provavelmente a maneira mais conveniente de representar salários e gastos, enquanto uma simulação da hora de pico pode ser suficiente para representar o subsistema de transporte (Transportation Development Branch, 1999).

4.1.1 Organização das bases de dados

Definidas questões básicas do processo de modelagem, como as três decisões tratadas anteriormente torna-se necessário identificar as bases de dados que poderão ajudar na calibração. Destaca-se que muitas das informações coletadas precisarão estar nas unidades de desagregação espacial e temporal previamente definidas.

Para quantificar e subdividir os setores transportáveis, a calibração necessita de dados censitários de população e empregos. Para caracterizar os setores não-transportáveis são

necessárias informações sobre o uso e ocupação do solo da região de estudo para que possam ser obtidas as áreas, tipos e preços de ocupação. Para representar o padrão de deslocamentos da população são necessárias informações de quantidades de viagens, divisão modal, distribuição de viagens ao longo do dia, motivos de viagens, carregamento das vias, matrizes origem-destino por categoria de viagem, entre outras informações que podem ser obtidas através de uma pesquisa domiciliar de origem-destino, mas que não precisa possuir uma amostra tão grande quanto as que são tradicionalmente realizadas (Barra, 2010).

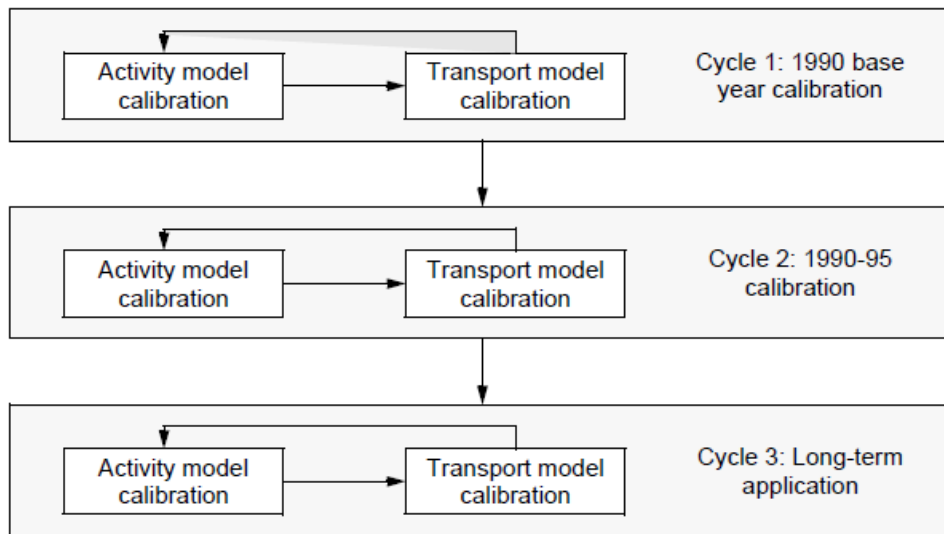
Em Belo Horizonte, o principal conjunto de dados utilizados por Pupier (2013) para comparação de resultados do padrão de deslocamentos do modelo e dados observados foram obtidos pela pesquisa origem-destino da região metropolitana de Belo Horizonte de 2002, atualizada para o ano de 2010. Para quantificar os setores transportáveis e não transportáveis foram utilizadas: a Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD), a Classificação Nacional de Atividades Econômicas (CNAE), o Cadastro Municipal de Contribuinte de Tributos Mobiliários (CMC), a Relação Anual de Informações Sociais (RAIS) e o Cadastro Central de Empresas.

4.1.2 Sequência de calibração

Como visto, os modelos utilizados pelo TRANUS estão interligados. Por conta disso, o processo de calibração torna-se iterativo. A aplicação do TRANUS para Oregon (Transportation Development Branch, 1999) utilizou o esquema de calibração da Figura 24. Três ciclos principais de calibração foram desenvolvidos com várias iterações dentro de cada um deles. Nos dois primeiros, foi necessário aplicar iterativamente o modelo, ajustando os parâmetros, até que os resultados fossem satisfatórios. No terceiro ciclo, o modelo foi aplicado de 1990 até 2020, com incrementos de cinco anos, com variações nos dados de entrada para testar a estabilidade e razoabilidade dos resultados e, onde necessário, refinar os parâmetros de calibração.

Entretanto, os objetivos inerentes aos ciclos 2 e 3 do processo de calibração do modelo de Oregon estão mais relacionados com o que se denomina de validação. Não importa quão bem o modelo reproduza o comportamento dos usuários, ele não será útil a não ser que consiga reproduzir o sistema modelado quando ocorrer modificações nos dados de entrada. Além disso, deve ser capaz de realizar previsões que correspondam razoavelmente bem com a realidade observada (Waddell, 2011).

Figura 24 - Processo de calibração



Fonte: Transportation Development Branch (1999).

A inter-relação entre os modelos do TRANUS e sua consequente dificuldade de calibração originou também uma proposta de método de calibração totalmente baseada na otimização. A execução do TRANUS produz diversos resultados relacionados com a localização das atividades, geração de viagens, distribuição de viagens e custos que podem ser comparados com dados reais. Pupier (2013) acredita que um bom método de calibração é definir uma função objetivo que meça a distância entre os resultados do modelo (X_i) e a realidade observada (X_i^o). Esta função possuiria “n” variáveis, como: carregamentos de links em importantes pontos da rede; divisão modal; número de viagens por motivos, entre outras. Portanto, o papel do modelador seria identificar as variáveis relevantes, seus valores na realidade observada e o coeficiente de importância de cada medida (a_i). Então, o modelo poderia ser executado repetidas vezes com pequenas modificações, alterando um parâmetro por vez, com o objetivo de minimizar a função objetivo (Equação 8). Entre os elementos que podem servir de comparação estariam: localização das atividades, escolha de caminhos, volume total de viagens, divisão modal, viagens por categoria de transporte, matrizes origem-destino e carregamento dos links.

$$f(\tilde{X}_n) = \sum_{i=1}^n a_i \frac{(X_i - X_i^o)^2}{(X_i^o)^2} \quad (8)$$

Apesar de considerar este método de calibração ideal, Pupier (2013) não o aplicou. Por limitações de ordem computacional não foi capaz de implementar a calibração automática.

Contudo, aplicar unicamente a otimização é desprezar a capacidade dos modelos matemáticos de viabilizarem o entendimento sobre o comportamento do fenômeno (Ortúzar e Willumsen, 2011), que é exatamente o que se propõe este trabalho. Portanto, a otimização pode ser uma ferramenta útil na calibração dos modelos que envolvam uma quantidade maior de parâmetros, mas não como ferramenta para calibrar todo o TRANUS de uma única vez.

Como alternativa, Pupier (2013) montou uma rotina composta por uma série de controles, a fim de obter uma medida qualitativa, mas razoável, da distância entre os resultados e a realidade. A descrição dessa rotina foca apenas nos aspectos operacionais, como copiar tabela, verificar se determinado indicador chegou em seu limite, entre outros aspectos. Entretanto, não apresenta como essa análise auxilia na definição do valor do parâmetro. Para operacionalizar essa rotina, não foi encontrada entre os manuais (Barra, 2010, 2012, 2014; Fernandez, 2012; Modelística, 2008, 2011a; b, 2012) nenhuma indicação sobre como a ordem de calibração dos modelos deva ocorrer. Nesses manuais, recorda-se constantemente que os modelos de transportes são dependentes dos modelos de uso do solo e indicam que para a calibração é importante a ocorrência de pelo menos uma interação entre os dois.

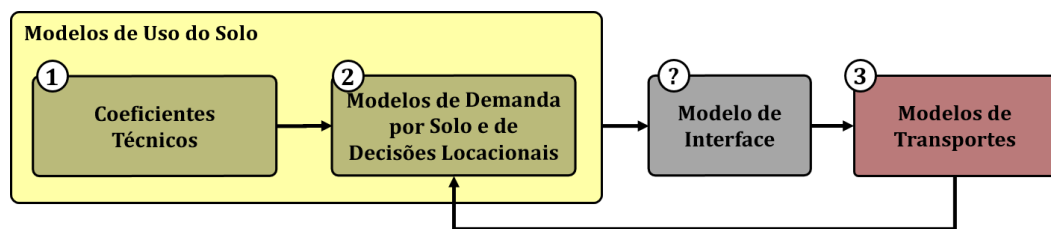
Entre os manuais e aplicações também é possível encontrar aqueles que citam a ordem de execução dos subprogramas do TRANUS para justificar a ordem de calibração. Existem pelo menos cinco programas internos ao TRANUS cada um deles responsável por uma parte específica da modelagem e dependente um do outro. O PASSOS é responsável por ler a rede e dados de transportes e estimar as opções de rotas para cada par origem-destino e conjunto de modos. O TRANS calcula os custos e desutilidades dessa rede. O COST transforma os custos e desutilidades de categorias de transporte para setores. O LCAL simula a localização e interação entre as atividades e o uso do solo e estima os fluxos econômicos. O FLUJ transforma os fluxos de setores para categorias de transportes. Recomenda-se ainda que para se chegar a um equilíbrio entre uso do solo e transportes é necessário executar a sequência COST-LCAL-FLUJ-TRANS repetidas vezes (Modelística, 2008).

Uma dificuldade na calibração dos modelos de uso do solo é que tudo está se modificando de uma iteração para outra, por conta do cálculo dos preços sombras. A produção dos setores transportáveis muda de localização a cada iteração, fazendo com que os setores não transportáveis e substitutos também se alterem. Para facilitar o processo de calibração desses modelos pode-se utilizar a opção “freeze”, que faz com que distribuição espacial dos setores transportáveis seja igual aos dados de entrada, ou seja, são ignorados os modelos de localização de atividades, concentrando-se assim nos modelos de demanda por solo e substitutos. Como as atividades estão fixas no espaço, os resultados obtidos são inteiramente atribuídos aos

parâmetros de demanda elástica e da função de substitutos. Essa opção é detalhada no modelo de calibração dos modelos de uso do solo (Barra, 2013).

As aplicações (Barra, Franco e Ramos, 2012; Feudo, 2014; Modelística, 2011b; Pereira, 2013; Pupier, 2013; Transportation Development Branch, 1999; Werneck, 2015) apesar de não detalharem a ordem de calibração, aplicam o ciclo de interação entre os modelos de uso do solo e de transportes, como pode ser visto na Figura 25. Essas aplicações apresentam textualmente os modelos da seguinte forma: coeficientes técnicos, modelos de uso do solo e modelos de transportes, que pode ser um indicativo para a ordem em que aplicaram a calibração. O modelo de interface, quando apresentado como elemento de calibração, não está sempre na mesma posição. Além disso, os coeficientes técnicos não são reconhecidos como modelos de atividades, mas sim pertencentes aos modelos de uso do solo.

Figura 25 - Sequência tradicional de calibração do TRANUS



Fonte: Elaborado pelo autor.

As duas abordagens de calibração geram basicamente os mesmos resultados. Como nenhuma das duas abordagens se preocupa com o que acontece no interior de cada modelo e reconhecem assim apenas o ciclo entre modelos de subsistemas de distintos, então a diferença é basicamente o ponto inicial. No capítulo 3, os modelos de demanda foram subdivididos em dois processos decisórios no subsistema de uso do solo e no subsistema de transportes. Entretanto, verificou-se que esses modelos são interdependentes, por conta disso pode-se afirmar que existem ciclos internos em cada um desses dois subsistemas. Esses ciclos internos são também importantes e não podem ser negligenciados nesse processo de calibração.

4.1.3 Modelo de atividades




A origem dos coeficientes técnicos é a própria matriz insumo-produto. Essas matrizes são criadas para relacionar os diversos tipos de indústrias; portanto, a partir delas, não é possível calibrar coeficientes entre setores populacionais e de atividades produtivas.

O método de calibração dos coeficientes técnicos proposto pelos manuais (Barra, 2014; Modelística, 2011a) é um método de otimização. Esse método é replicado para cada setor demandado e sua função objetivo é a minimização da diferença entre o total coletado de unidades do setor demandado e o total de unidades modeladas. As variáveis a serem modificadas são os próprios coeficientes técnicos, mas limitados por um conjunto de restrições. Essas restrições são assumidas a partir de premissas quanto as relações de consumo e produção do setor demandado que se está calibrando. Por exemplo, uma premissa de que o setor populacional de baixa renda é mais demandado pelo setor industrial do que pelo setor de serviços. Essas premissas podem ser também embasadas em estudos que forneçam essas relações, mas as aplicações não fizeram uso de nenhum estudo desse tipo.

Dessa forma, se existir mais de um coeficiente técnico a ser calibrado para um mesmo setor demandado, existirão infinitas soluções que atendem a função objetivo. Por exemplo, na calibração dos coeficientes do tipo 4 que representam o consumo do setor populacional (D) pelos setores industrial (A), comercial (B) e de serviços (C) dados os totais de cada setor na Figura 26, a função objetivo seria $X^D = 3000$, tendo como argumento a Equação 9. Neste caso, existem infinitas possibilidades de combinação dos três parâmetros para que a função objetivo seja satisfeita, mesmo com as restrições que apenas limitariam o espaço de busca por esses coeficientes.

$$6000 \cdot a^{AD} + 4000 \cdot a^{BD} + 2000 \cdot a^{CD} = 3000 \quad (9)$$

Figura 26 - Exemplo de calibração dos coeficientes técnicos

				(X^m)
\$	a^{AD}	a^{BD}	a^{CD}	3000
(X^n)	6000	4000	2000	

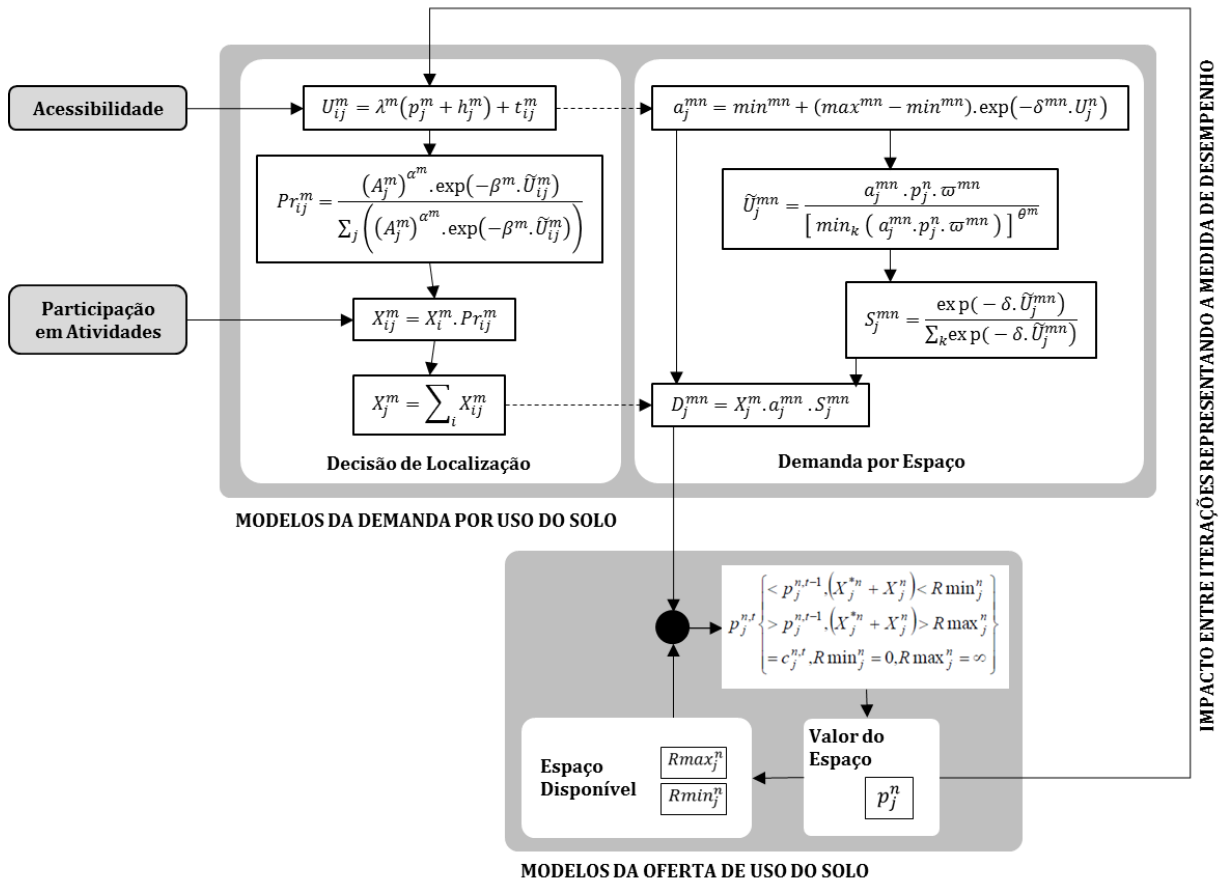
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.4 Modelos de uso do solo

Como visto no tópico 3.3.1, dois modelos são responsáveis por simular a demanda do subsistema de uso do solo. Em um processo iterativo essa demanda interage com elementos da oferta do solo, formando assim a medida de desempenho desse subsistema: o preço do solo.

Essas relações são matematicamente apresentadas na Figura 27. Nesta fase da calibração é recomendada a utilização da opção “freeze” reduzindo assim a calibração aos parâmetros da demanda elástica, penalidades, e parâmetros de dispersão, se existirem substitutos, eliminado assim o impacto representado pelas setas tracejadas.

Figura 27 - Modelos de uso do solo



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para calibrar os mínimos e máximos da função elástica de demanda por solo, Werneck (2015) comparou a quantidade de solo desejada por cada setor com o solo presente em cada uma das zonas, entretanto não definiu o que seria esse solo desejado. Encontrou que as zonas que mais diferem são 38% e 648% diferentes da média e assumiu esses percentuais para definir os mínimos e os máximos. A elasticidade foi calibrada através da plotagem de curvas de demanda por solo para uma faixa aceitável de preços do solo, entretanto não definiu o que seria essa faixa aceitável. O valor de 0.04 para a elasticidade foi escolhido porque permitiu que na amplitude de preços do solo se chegasse até os valores mínimos e máximos, além de ter feito o

modelo de uso do solo convergir. Essa aplicação para Belo Horizonte possui apenas um tipo de solo, portanto, não houve necessidade de calibrar parâmetros do modelo de substitutos.

Os manuais da plataforma não detalham o processo de calibração da função de demanda por solo com clareza. Nestas condições, Pupier (2013) afirma que a calibração do parâmetro de elasticidade, fundamental para a função de demanda, é por ele considerado um dos momentos mais abstrato e arbitrário de toda a calibração. Mesmo o manual de calibração dos modelos de uso do solo (Barra, 2013) dá uma ênfase muito maior ao preço sombra, do que nos parâmetros a serem calibrados. As principais conclusões obtidas desse manual sobre os preços sombras serão destacadas a seguir.

Geralmente, os preços sombra levam a situações em que os valores modelados e os dados coletados combinam com considerável precisão. Dessa forma, indicadores tradicionais de correlação, como o R^2 , se tornam inúteis para avaliar a qualidade desses modelos, pois possuirão o valor de um na maioria dos casos. Sendo assim, a magnitude dos preços sombra é a medida de desempenho a ser utilizada para a calibração do primeiro conjunto de funções da modelagem do uso do solo. Essa variável é capaz de indicar possíveis erros de estimação da função de demanda por solo. Por exemplo, preços sombras consistentemente elevados, indica que as funções de demanda estão gerando muito consumo de solo. Se existem muitos setores competindo pelo tipo de setor com elevado preço sombra, como diferentes tipos de domicílios por renda competindo por solo residencial, pode ser útil o estudo da correlação entre os preços sombra e a proporção de domicílios de cada setor para identificar o grupo está causando o problema. Os ajustes de parâmetros propostos por esse manual são todos realizados de forma manual.

A importância do preço sombra se destaca também na proposta de calibração desenvolvida por Capelle, Sturm e Vidard (2015) para os parâmetros de substituição. A calibração desses parâmetros é subdividida em duas fases. Na primeira, os valores iniciais dos parâmetros de substituição são estimados a partir de uma regressão multinomial logística, onde é necessário possuir informação sobre quantidade e custo de solo consumido por cada setor transportável. Nesta fase, a variável dependente é o setor não transportável escolhido e a variável independente é o custo. Na segunda fase, ocorre um ajuste mais fino destes parâmetros, pois ainda deverão existir diferenças entre o solo modelado e o que é realmente consumido. Para isso, é proposta uma abordagem de otimização onde a função objetivo é deixar os preços sombra com o valor zero. O método foi aplicado para um conjunto de dados sintéticos e também numa aplicação real na Carolina do Norte e obteve resultados satisfatórios.

Entretanto, focar a calibração inicialmente nas penalidades da função de substitutos não parece ser a alternativa mais razoável, pois existe um modelo anterior, a demanda elástica, capaz de simular as modificações de consumo a partir da desutilidade. Ao se calibrar primeiro as penalidades, incorpora-se neste parâmetro parte do efeito que deveria estar sendo capturada pela variável " a_j^{mn} ". Por conta disso, o foco inicial dessa calibração deve estar nas funções elásticas, que possuem atributos bem definidos e condizentes com a representação do fenômeno e só então seguir para a calibração de substitutos. Dessa forma, os valores das penalidades irão incorporar apenas atributos da decisão que não estão explícitos na modelagem.

Calibrar esses parâmetros de forma automatizada através de otimização não é garantia de que o resultado obtido para os parâmetros é o melhor que podia ser observado, muito menos que representa a realidade de maneira fidedigna. A busca de uma solução através de otimização pode até garantir um ótimo local, quando mudanças pequenas dos parâmetros não produzirão resultados melhores. Os métodos de otimização utilizados na calibração de modelos LUTI geralmente são métodos não exatos, denominados de heurísticas. Portanto, ambos os métodos de calibração aplicados para o TRANUS são heurísticos, sejam eles manuais ou automatizadas. Uma das vantagens em se utilizar o método automatizado é que permite a avaliação de uma maior quantidade de soluções. Como desvantagem, pode-se citar o fato de que o modelador não reconhece os resultados intermediários, apenas utiliza o melhor. Dessa forma, pode estar perdendo uma solução mais condizente com o fenômeno, mas que não tenha otimizado a função objetivo.

A modelagem da localização das atividades, um dos submodelos da demanda por uso solo, identifica a quantidade do produto "m" produzido na zona "j". Seu principal modelo é um modelo *logit* multinomial que calcula as probabilidades de produção em cada zona, cuja formulação da desutilidade é a mesma utilizada para representar a demanda por solo. Entretanto o termo " t_{ij}^m ", que representa a desutilidade de transportes, dessa vez possui valor. Por conta disso, é necessário que a rede de transportes já tenha sido concluída, o modelo de definição de caminhos executado, e os custos e desutilidades da rede de transportes obtidos. Nesse momento, essa rede ainda está sem carregamento, portanto os custos e desutilidade representam o nível de serviço ótimo dessa rede.

O processo de calibração proposto pelos manuais da plataforma é uma heurística manual e sugere que da mesma forma que os preços sombra são utilizados para avaliar o ajuste dos modelos de demanda por solo, eles também podem ser analisados para avaliar os modelos de decisão locacional. Nesse caso, não se buscam preços sombra baixos, mas sim preços sombras

similares entre as zonas. Em outras palavras, o desvio padrão desses ajustes deverá ser o menor possível. Isso ocorre porque o menor valor de utilidade não importa, pois ele é escalonado e perde sua ordem de grandeza e não volta a ser multiplicado pela mínima utilidade como ocorre na modelagem dos substitutos. Portanto, busca-se apenas que esse preço interfira de maneira similar entre todas as zonas, aumentando ou reduzindo o preço da atividade de maneira igual em qualquer zona.

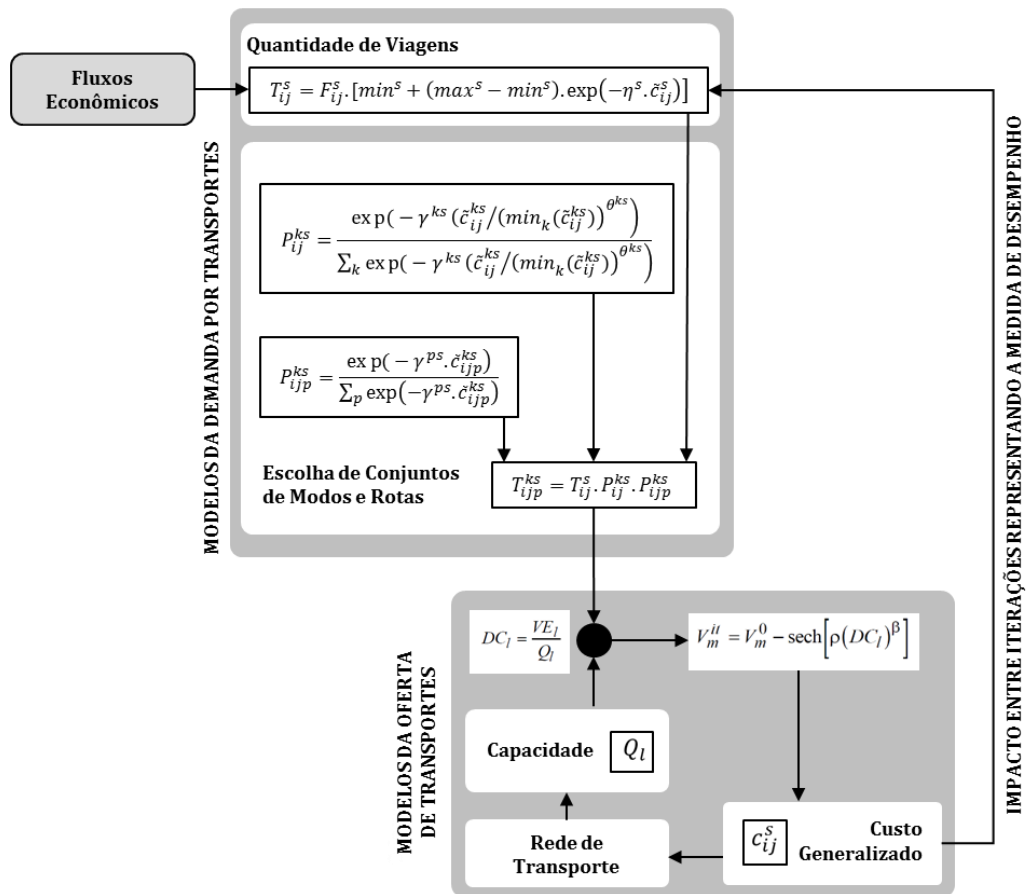
A argumentação de Barra (2013) aponta para uma interpretação fenomenológica dos preços sombra, pois seriam capazes de trazer consigo informações sobre os atributos utilizados pela população a decidir morar em determinada região, além do preço do solo e dos transportes. Um estudo de correlação dessa variável com outras candidatas a influenciarem as decisões locacionais, como a densidade populacional, pode ser uma maneira de compreender quais seriam esses outros atributos. Se for constatado que outros atributos influem na decisão da localização, essa relação pode ser inserida no modelo através do parâmetro de atratividade. Além disso, se, para um determinado setor, o valor dos preços sombra é positivo em áreas centrais e negativo nas periferias isso pode significar que o parâmetro “ λ_m ”, que regula a importância relativa da desutilidade de transportes em comparação aos preços do solo está dando muita importância à impedância do deslocamento.

4.1.5 Modelos de transportes

O terceiro parâmetro da função elástica é a elasticidade (η^S), mas como o fluxo econômico e o custo generalizado são unidades que só existem na simulação do TRANUS e não podem ser observados, então a calibração da elasticidade é dependente da execução da ferramenta. O método de calibração para esse parâmetro é também uma heurística manual. O ajuste dessa função pode ser verificado através da observação da quantidade de viagens realizadas, assim como da distribuição das viagens por categoria de transportes, através da pesquisa origem-destino. Entretanto, não é expresso como essas variáveis irão indicar qual parâmetro deve ou não ter seu valor modificado.

Nos modelos de transportes, muitas das variáveis necessárias são dados coletados, por exemplo as tarifas de embarque de transporte coletivo, frequências e capacidades desses serviços. Além desses, dois parâmetros da função elástica (Figura 28) podem ser obtidos através de pesquisas origem-destino: as quantidades mínimas (v_{min}^S) e máximas (v_{max}^S) realizadas para cada fluxo econômico.

Figura 28 - Modelos de transporte



Fonte: Elaborado pelo autor.

É impossível separar a execução dos modelos de transportes, uma vez que o custo generalizado utilizado na função elástica é o custo composto das desutilidades de transporte utilizadas pelo modelo de escolha de modos e caminhos. Portanto, apesar de serem modelos distintos, sua execução ocorre de maneira simultânea com cada um impactando fortemente o outro.

A partir do custo generalizado ocorre o processo de modelagem das proporções das viagens que escolhem utilizar cada um dos conjuntos de modos e cada um dos caminhos. Além dos parâmetros do custo generalizado, apenas quatro parâmetros existem nas decisões: fatores de escala de escolha de caminho (θ^{ps}) e de conjuntos de modos (θ^{ks}), que regulam a importância da menor desutilidade em comparação às demais; e as elasticidades nas decisões de caminho (γ^{ps}) e de conjunto de modos (γ^{ks}), que regulam o impacto da diferença de cada unidade entre as desutilidades. Usualmente, apenas um conjunto de modos é utilizado, pois todos os modos que transportam passageiros são agrupados. Isso elimina a necessidade de

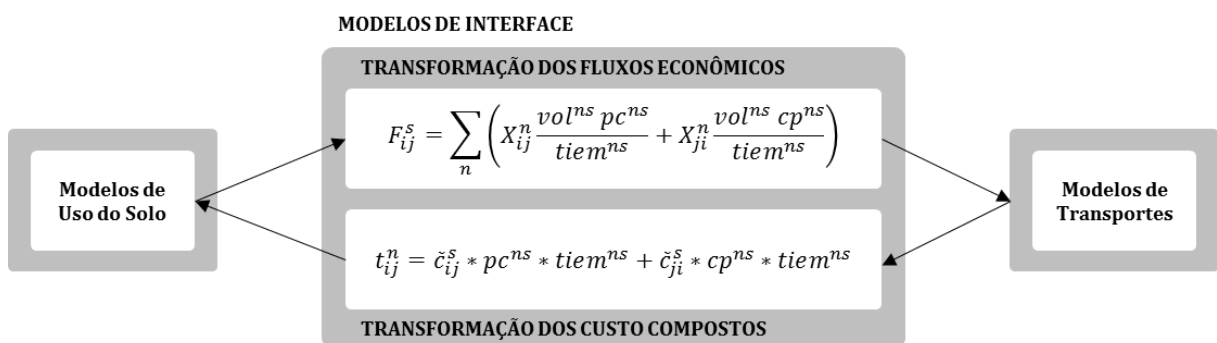
calibração dos parâmetros de conjunto de modos, entretanto amplia a possibilidade de erros decorrentes do não atendimento da premissa de IIA na escolha de rotas.

A calibração desses parâmetros ocorre manualmente através da verificação dos fluxos nas vias, carregamentos dos veículos do transporte coletivo, quantidade de embarques e desembarques por parada, divisão modal por categoria de transporte, entre outras informações que podem ser utilizadas nesse processo. A determinação do valor do tempo pode ocorrer de forma externa a essa heurística. Pupier (2013) determinou esses valores com base na renda média de cada categoria de viagem.

4.1.6 Modelo da interface

Os modelos de interface (Figura 29) possuem 4 parâmetros para serem calibrados. O primeiro deles é a relação entre categoria e setor (vol^{ns}). Na modelagem do transporte urbano de pessoas esse parâmetro é usualmente deixado como “1”, inferindo que a cada fluxo do setor “n” será originado um fluxo econômico da categoria de transporte “s”. Entretanto, essa é uma informação que dependerá das unidades adotada. Na aplicação para Belo Horizonte o setor educacional foi representado pela quantidade de empregos do setor educacional, logo o parâmetro “ vol^{ns} ” foi utilizado para transformar essa quantidade de empregos em quantidades de alunos, esses sim responsáveis por gerar as viagens do tipo educacional.

Figura 29 - Modelos de interface



Fonte: Elaborado pelo autor.

O segundo e o terceiro parâmetros estão relacionados com o sentido do fluxo e com o período de tempo para a qual a simulação está sendo realizada. No período da manhã, os deslocamentos de setores da população estão indo no sentido da zona em que foram demandados, ou seja, para os seus lugares de trabalho. Dessa forma, “ pc^{ns} ” poderia ser um e

“ cp^{ns} ” poderia ser zero. Nesse mesmo período, os fluxos de setores produtivos originam demanda no sentido da sua produção, pois o deslocamento que ocorre é o de pessoas indo às compras, sendo assim, “ pc^{ns} ” poderia ser zero e “ cp^{ns} ” poderia ser um. Apesar do exemplo anterior ter utilizado apenas zeros e uns, esses valores podem assumir qualquer valor entre 0 e 1, pois eles representam o percentual de fluxos que vão em cada sentido.

O último parâmetro dessa função é o “ $tiem^{ns}$ ”, que relacionará a quantidade de viagens que ocorrem no período de simulação do subsistema de transporte, com a quantidade de viagens que ocorre no período de simulação do subsistema de uso do solo. Se foi constatado que 10% das viagens ocorrem no período de simulação dos transportes, pico da manhã por exemplo, significa que durante o dia existem 10 vezes mais viagens do que o simulado e que o custo de cada setor com as viagens durante o dia é 10 vezes maior do que aquele verificado no pico da manhã. Se o período de simulação do subsistema de atividades for a semana, existem 5 dias úteis (período em que as relações econômicas ocorrem), então o “ $tiem^{ns}$ ” deverá ser de 50 indicando que os fluxos serão reduzidos em 50 vezes e os custos multiplicados por 50 para que possam ser comparados com o preço de aluguel do solo.

Para a calibração destes parâmetros, pode ser realizada uma pesquisa em que um dos objetivos seja conhecer os horários e quantidades de viagens por categoria de transportes, mas que se pergunte também informações que permitam identificar o setor que motiva essa viagem. Em geral, pesquisas domiciliares de origem e destino já são capazes de fornecer as informações necessárias a esta calibração.

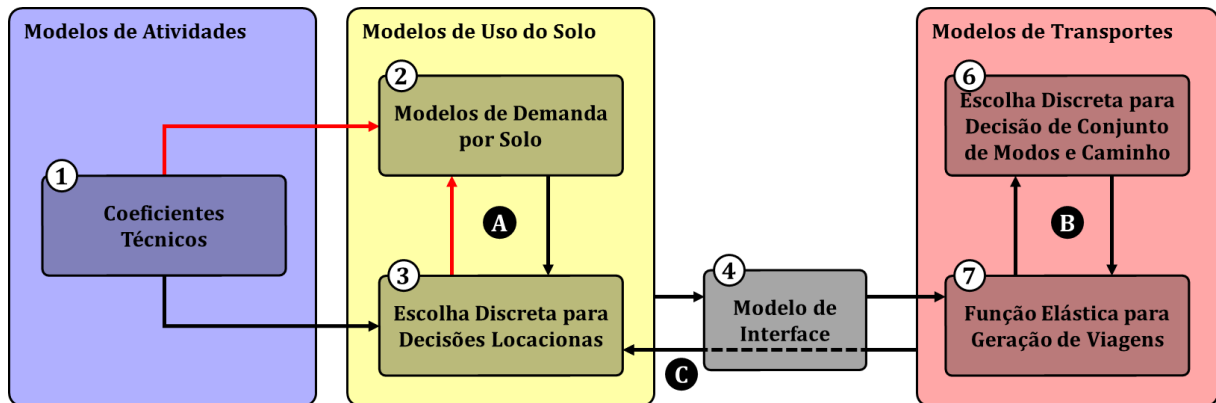
4.2 Proposta metodológica

Ao longo da seção anterior, foram sendo apresentadas limitações dos métodos de calibração usualmente adotados. Nesta seção, serão propostos métodos que solucionam algumas dessas limitações. O benefício de se utilizar os métodos aqui propostos está no objetivo de propor um método que auxilie a compreensão da problemática. Portanto, essa proposição focará em calibrar os parâmetros que sejam mais relevantes e tomará por base três elementos: 1) proposta de calibração convencionalmente adotada, pois serão adaptados os métodos existentes ao invés de substituí-los totalmente; 2) parâmetros mais relevantes ao processo de calibração; 3) relações entre os modelos, quantificadas pelas medidas de desempenho e de impacto.

4.2.1 Sequência de calibração

A sequência utilizada nas aplicações apresenta a calibração dos modelos internos a cada subsistema de forma linear. Nesses métodos, existe apenas um único ciclo, que ocorre entre os modelos de transporte e os modelos de uso do solo e atividades. Entretanto, sabe-se que há também interdependência entre os modelos internos a cada subsistema, portanto o método de calibração deve considerar todos eles. A ordem proposta neste trabalho foi definida considerando o nível de independência que cada modelo possui dos demais, ou que se utilize da maior quantidade de modelos previamente calibrados. Pensando nisso, foi proposta a sequência da Figura 30.

Figura 30 - Sequência de calibração



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os coeficientes técnicos são utilizados por outros dois modelos, mas não necessitam de informações adicionais para seu funcionamento, portanto são os parâmetros mais independentes do TRANUS e, por isso, foram definidos como sendo os primeiros a serem calibrados. A continuidade do processo ocorrerá através da calibração dos modelos de demanda por solo, que podem ter suas relações de dependência (setas em vermelho) suprimidas, uma vez que é possível utilizar diretamente os dados coletados da distribuição espacial no ano-base. Os modelos responsáveis pelas decisões locais dependem das informações de transportes; entretanto, nesse estágio inicial da modelagem, ainda não foram estimadas as viagens para serem alocadas. Portanto, em um primeiro momento, as informações de transportes são obtidas a partir de uma rede sem carregamentos, mas considerando a demanda por solo, previamente calibrada. Esse é o ciclo "A" do processo de calibração, onde os modelos de uso do solo são calibrados.

Os modelos de atividades e de uso de solo fornecem a quantidade de cada setor produzido em uma zona e demandado por outra. Essa informação é a única no modelo de interface que é proveniente do subsistema de uso do solo; sendo assim, esse modelo já pode ser calibrado para que gere os fluxos econômicos, que, por sua vez, são dados de entrada do modelo de geração de viagens. Os dois grupos de modelos do subsistema de transportes são interdependentes, já que o custo generalizado é utilizado por ambos; sendo assim, devem ser calibrados simultaneamente, o que consolida o ciclo “B” do processo de calibração. O ciclo “C” é externo e envolve a modificação dos modelos de decisão locacional a partir das informações provenientes do subsistema de transportes, agora com viagens carregando a rede. Entretanto, uma nova distribuição espacial de atividades gerará um novo padrão de deslocamentos, o que pode gerar a necessidade de retornar aos modelos de transportes. Apesar da existência do ciclo “C”, não se espera um equilíbrio completo de todo o sistema (Pupier, 2013) pois, mesmo que cada subsistema a ser modelado assuma equilíbrio entre demanda e oferta, não existe na plataforma a premissa de equilíbrio entre eles.

4.2.2 Parâmetros de interesse

Em um processo de modelagem composto por uma quantidade elevada de parâmetros interligados, como são os modelos LUTI, torna-se necessário a definição dos principais parâmetros a serem calibrados. Ao longo do Capítulo 3, cada uma das variáveis do TRANUS foi descrita. Algumas eram dados de entrada, outras eram resultados da modelagem e os demais parâmetros de calibração, como pode ser visto na Figura 23. Entre os parâmetros, tiveram aqueles que foram considerados indicadores capazes de representar parte da problemática de algum dos três subsistemas urbanos. Desses indicadores, alguns são úteis na fase de calibração e outros no diagnóstico dessa problemática.




Os indicadores são a principal contribuição dos modelos em um processo de modelagem, são eles que tornam possível a avaliação de alternativas, mas são eles também que permitem a construção de um ambiente de diálogo e de aprendizado para os tomadores de decisão. Por conta disso, o foco do processo de calibração deve estar nos parâmetros que sejam também indicadores da problemática. Destaca-se que os demais parâmetros ainda precisam ser calibrados, mas com o objetivo apenas de garantir um melhor ajuste do modelo. A Figura 23 apresenta a classificação das variáveis do TRANUS e destaca em vermelho os parâmetros que são também úteis como indicadores e que serão foco das discussões a seguir.

4.2.3 Modelo de atividades

Pelas limitações do método tradicional de calibração desses coeficientes, propõe-se um método alternativo que se baseia no conhecimento prévio das relações entre os setores. Essas relações poderão ser obtidas de forma direta. Nestes casos, os dados coletados permitirão que as relações sejam construídas nas mesmas unidades utilizadas no processo de modelagem. Essas relações também podem ser obtidas de maneira indireta, quando os dados coletados relacionam os setores com unidades distintas daquelas utilizadas no processo de modelagem. Já neste caso, são necessários ajustes para se chegar as unidades necessárias.

Como exemplo, assume-se que as unidades dos setores A, B e C sejam empregos e a do setor D sejam pessoas, tornando-se necessário obter a quantidade de pessoas demandada por cada tipo de emprego. Assumindo que foi obtida a informação de que das 3000 pessoas do tipo D, 1000 delas estão empregadas no setor A, 1500 no setor B e as demais no setor C, como apresentado na Figura 31, será possível obter os coeficientes de maneira direta.

Figura 31 - Calibração dos coeficientes técnicos com dados diretos

				(X^m)
\$	1000	1500	1500	3000
(X^n)	6000	4000	2000	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Sabendo que uma unidade do setor “n” demanda uma quantidade “ a^{mn} ” do setor “m”; então, se existirem “ X^n ” unidades de “n”, existirão “ $X^n \cdot a^{mn}$ ” unidades de “m”, ou “ X^{mn} ” unidade de “m” demandadas por “n”. Essa relação é matematicamente expressa na Equação 10.

$$X^n \cdot a^{mn} = X^{mn} \quad (10)$$

Dessa forma, a equação possui uma única solução, como pode ser visto no conjunto de equações 11, que obtém os coeficientes do exemplo, com uma equação linear para cada incógnita.

$$\begin{aligned}
 X^A \cdot a^{AD} &= X^{AD} / X^B \cdot a^{BD} = X^{BD} / X^C \cdot a^{CD} = X^{CD} & (11) \\
 6000 \cdot a^{AD} &= 1000 / 4000 \cdot a^{BD} = 1500 / 2000 \cdot a^{CD} = 1500 \\
 a^{AD} &= 0.167 / a^{BD} = 0.375 / a^{CD} = 0.750
 \end{aligned}$$

O processo de calibração não deve ser finalizado ao se estimarem os parâmetros. A interpretação desses valores pode dar informações fundamentais sobre o fenômeno que se está analisando. No Capítulo 3, os coeficientes técnicos foram apontados como indicadores capazes de diagnosticar as relações causais entre dois setores de atividades. Dessa forma, podem contribuir na compreensão da problemática interna ao subsistema de atividades, pois relacionam diretamente a demanda e a oferta de cada setor, assim como as relações existentes entre eles. Além disso, podem também auxiliar na compreensão de problemas que envolvam os subsistemas de transportes e de uso do solo.

Para que seja realizado algum tipo de diagnóstico é necessário que tenha ocorrido primeiro uma caracterização da problemática em estudo. No diagnóstico interno ao subsistema de atividade, a caracterização ocorre a partir das próprias quantidades de cada setor. Já no diagnóstico em si, são utilizados os valores dos coeficientes técnicos para quantificar as relações de dependência entre os setores.

Para diagnosticar as relações entre subsistemas, a caracterização dos setores deve ser realizada de maneira espacial. Essa caracterização pode ser realizada por mapas onde estejam expressas as distribuições espaciais de cada setor. Entre esses mapas podemos destacar os mapas de quantis, que ordenam as zonas de acordo com a variável em questão e depois as subdividem em “q” subconjuntos com a mesma quantidade de zonas. Com esta representação, será possível identificar as zonas com as maiores quantidades da variável em análise. Entretanto, os *outliers* não serão destacados, pois serão apresentados em classes com outras zonas que não sejam *outliers*. Como ponto positivo, esse tipo de mapa facilita a comparação entre distintas variáveis, já que as classes de mapas distintos terão o mesmo significado. Quanto a variável, pode-se destacar o fato de que ela deve ser uma medida relativa quanto as áreas das zonas. Dessa forma, a comparação entre zonas será realizada sem considerar que uma zona é maior ou menor que outra. Por exemplo, para verificar o padrão de distribuição espacial do setor populacional, recomenda-se a utilização da variável densidade populacional, ao invés da variável quantidade de pessoas.

Caracterizados os setores, os valores dos coeficientes técnicos podem ser utilizados para diagnosticar as relações de causalidade entre o subsistema de uso do solo e o subsistema de transportes. A análise deverá se concentrar entre setores que possuem os maiores coeficientes

técnicos, pois indicam uma maior intensidade das relações. Dessa forma, se os setores com relacionamento mais intenso estiverem localizados na mesma região é de se esperar que problemas do subsistema de transportes, como elevado tempo de viagem, não venham a ocorrer. Entretanto, se esses setores se comportam espacialmente de maneiras distintas, então problemas de grandes deslocamentos e tempos de viagens podem estar ocorrendo.

4.2.4 Modelos de uso do solo

A calibração do uso do solo não precisa ocorrer totalmente por uma heurística manual, ou totalmente por uma heurística automatizada, pois existem parâmetros que podem ser obtidos a partir de dados coletados. Enquanto outros, podem passar por um processo automatizado para agilizar o processo e garantir uma análise maior de soluções, a fim de que o objetivo seja alcançado com maior precisão, como será apresentado a seguir.

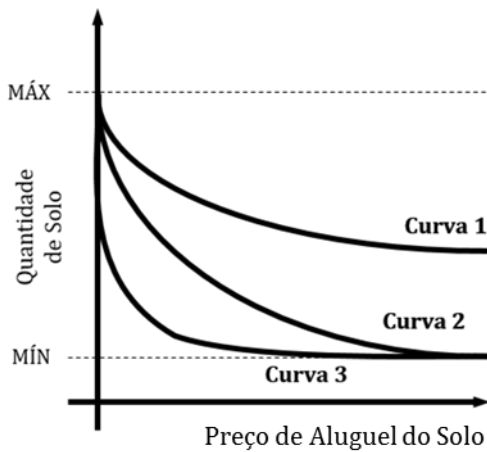
Os mínimos e máximos da função de demanda elástica são os responsáveis por orientar os limites de consumo do solo. Como visto, os dados de uso do solo têm sido uma fonte importante de coleta dessas informações, mas, em alguns casos, essas informações podem não estar totalmente disponíveis. Nestas situações, sugere-se que as pesquisas domiciliares de origem-destino possuam também questões que permitam caracterizar o solo ocupado, como: tipo de solo, preço de aluguel, área edificada e área do lote. Com essas questões, ou se utilizando de dados completos sobre a cidade é possível identificar os limites estabelecidos.

Com os limites estabelecidos, pode-se avaliar o comportamento do modelo de elasticidade para distintos valores de elasticidades, assim como fez Pupier (2013). Nesse caso, será apenas definido o tipo de curva que se deseja. Entre os exemplos da Figura 32, as curvas 3 e 1 não são desejadas. A Curva 3 porque alcança o limite mínimo num ponto mediano de desutilidade. E a Curva 1 porque o limite mínimo não é alcançado dentro da amplitude de valores de desutilidade. A situação de partida que deve ser adotada é uma situação similar ao da Curva 2, onde o mínimo e o máximo são alcançados em um intervalo aceitável de valores de desutilidade. Nessa análise, a amplitude de valores de preço é fundamental. Neste caso, o menor valor deve ser sempre zero, já que, ao longo das simulações, o solo pode ser desvalorizado. E o maior valor deve ser duas vezes o maior valor coletado. Esse é um preço médio dos solos de determinado tipo, em determinada zona.

Para a calibração inicial dos parâmetros da função de desutilidade dos substitutos pode ser utilizado um gráfico que avalie o comportamento da desutilidade com o aumento do preço de aluguel do solo (Figura 33). Nesses casos as curvas desejadas são do tipo B, ou C, que

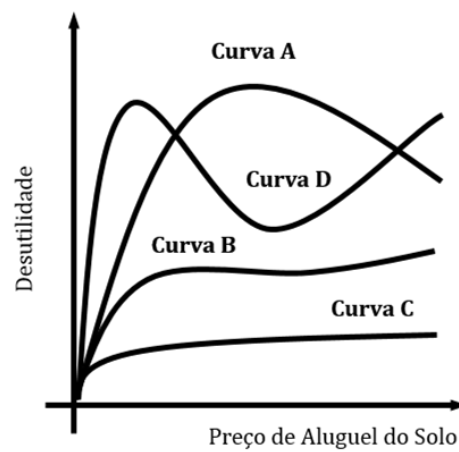
possuem um patamar de consumo estável, ou seja, em uma amplitude de valores de preço do solo a desutilidade por aquele solo se mantém constante. As Curvas A e D indicam que com o aumento do preço a desutilidade pelo solo tende a reduzir, o que é contra intuitivo. Essa situação ocorre quando o preço aumenta pouco, mas a quantidade de solo consumido (a_j^{mn}) reduz muito, ou seja, um ajuste na função de demanda pode ser necessário.

Figura 32 - Demanda elástica



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 33 - Modelagem dos substitutos



Fonte: Elaborado pelo autor.

Partindo do que foi feito por Capelle, Sturm e Vidard (2005), é proposto um método de otimização em que os parâmetros das elasticidades (δ^{mn}) e penalidades (ϖ^{mn}) possam ser melhor ajustados. Ao contrário do que fizeram os autores, o processo deve ser iniciado com as elasticidades, pois influenciam na calibração das penalidades. Além disso, a função objetivo (Equação 12) da otimização é proposta como uma diferença entre a quantidade de solos modelados (\bar{D}_i^n) e observados (D_i^n) por tipo e por zona. Os autores, aplicaram uma minimização do preço sombra, entretanto esses valores só são obtidos ao se executar o TRANUS, enquanto o solo modelado pode ser simulado em planilhas eletrônicas.

$$\text{Min} \sum_n (D_i^n - \bar{D}_i^n)^2 \quad (12)$$

Em seguida, o processo de otimização deve ser reexecutado, mantendo o objetivo de minimizar as diferenças entre dados coletados e modelados, mas buscando a otimização dos parâmetros de penalidade da função de substitutos. Calibrados os parâmetros, eles devem ser inseridos no TRANUS para que sejam fornecidos os preços sombras e assim avaliar o ajuste do

modelo. Esta execução deve fazer da opção “freeze” para que apenas os modelos de demanda sejam executados. Mesmo com a modificação do método de calibração, todas as análises sobre o preço sombra discutidas por Barra (2013) continuam sendo válidas e as ações que devem ser executadas a partir da análise dos preços sombras.

Quando o modelo de demanda por solo estiver calibrado, parte-se para a calibração dos modelos de decisão locacional. Reconheceu-se que apenas o parâmetro “ λ^m ” de relação entre preços de solo e desutilidades de transportes capaz de produzir informações sobre a problemática. Esse é um parâmetro que só pode ser calibrado ao se avaliar a evolução temporal do fenômeno. Independentemente do valor que ele assuma, o TRANUS calculará preços sombras para as atividades que farão com que o dado modelado seja muito próximo ao dado coletado. Barra (2013) afirma que se os preços sombras da região periférica foram mais baixos do que o da área central de uma cidade, significaria que a desutilidade de transportes importa mais na decisão. Dessa forma, seria necessário aumentar o parâmetro “ λ^m ” para compensar esse efeito. Entretanto, é possível que o setor em análise realmente se comporte dessa forma e que dê mais importância a chegar rápido ao seu local de trabalho, ao invés de morar em uma região com preço de solo mais baixo.

Para explicar como esse parâmetro pode ser calibrado, retorna-se à análise de dinamicidade realizada no Capítulo 2, e a compreensão de como o TRANUS simula esse conceito, realizada no Capítulo 3. Observou-se que a dinamicidade está relacionada com o tempo de simulação de cada subsistema, mas também com o impacto que cada subsistema realiza no outro. Verificou-se que, no TRANUS, os modelos de uso do solo recebem informações de si mesmos e também dos modelos de transportes em cenários seguintes. Isso se deve ao fato de que as decisões do subsistema de uso do solo se modificam de forma lenta, portanto, ao longo do tempo, utiliza informações de cenários passados para as decisões presentes. Dessa forma, para calibrar o parâmetro “ λ^m ” é necessário possuir informações de dois períodos de tempo distintos do subsistema de uso do solo. Se no cenário base, os preços sombras apontam para uma prevalência da impedância de transportes nas decisões locacionais e, no cenário projetado, ocorre um adensamento da área central maior do que o que é verificado nos dados, então existe um indicativo de que o parâmetro realmente precisa ser elevado. Entretanto, se a projeção do modelo for similar aos dados observados, o parâmetro pode ser considerado calibrado.

Apesar do foco da calibração ter sido posta no padrão “ λ^m ”, existem outros parâmetros que precisam ser calibrados, como a atratividade “ A_j^m ”, o fator de escala “ α^m ” e as elasticidades

“ β^m ”. A atratividade “ A_j^m ” pode ser calibrada pelos preços sombras, assim como proposto nos métodos convencionais. E para o fator de escala “ α^m ” e a elasticidade “ β^m ” recomenda-se que sejam deixados com o valor padrão de 1 por falta de um método adequado para sua calibração.

4.2.5 Modelos de transporte

Para os modelos de transportes não são propostas modificações na forma de estimações dos parâmetros. Esse método continua sendo heurístico e manual, ou tentativa e erro. Entretanto, foi inserida uma sistematização a este processo. Também tratou-se de como as variáveis quantidade de viagens e custo composto podem ser úteis ao processo de compreensão da problemática que envolve a acessibilidade e a mobilidade urbanas. As variáveis foco deste processo de calibração são apresentadas na Tabela 6, a seguir:

Tabela 6 - Parâmetros e indicadores dos modelos de transporte

Variável	Descrição
min^s	Limite mínimo da geração de viagens por categoria de transportes
max^s	Limite máximo da geração de viagens por categoria de transportes
η^s	Elasticidade da geração de viagens por categoria de transportes
vtv^s	Valor do Tempo de Viagem por categoria de transportes
vte^s	Valor do Tempo de Espera por categoria de transportes
α_{ks}	Constante específica do custo generalizado por modos, denominado de <i>modal constant</i>
γ_{ks}	Constante específica do custo generalizado por modos e por categoria de viagens, denominado de <i>penal fator</i>
β_{ks}	Parâmetro do atributo custo do custo generalizado por modos e por categoria de viagens, denominado de <i>tariff fator</i>

Fonte: Elaborado pelo autor.

A forma ideal de calibração dos parâmetros do custo generalizado é através da calibração da função de utilidade que ela representa, seja através de pesquisas de preferência declarada, ou de preferência revelada. Na impossibilidade de realização de uma pesquisa para calibrar todos esses parâmetros, recomenda-se que seja pelo menos aplicada uma pesquisa de preferência declarada com o objetivo de calibrar os valores do tempo. Os demais parâmetros podem passar por uma calibração através de tentativa e erro, mas de maneira sistematizada.

A primeira etapa é coletar variáveis sobre os quatro elementos das decisões de viagens: quantidade, origens e destinos, modos e rotas. Como exemplo de variável para cada um desses

elementos, pode-se citar respectivamente: quantidade de viagens por motivo; matriz origem-destino por motivo; divisão modal; e fluxos na rede. Entretanto, existem outras variáveis para representar esses elementos. O que importa nesta escolha é que todas as subdivisões do estudo (espacial, de setores e temporal) estejam bem representada por essas variáveis. Para os três primeiros elementos podem ser utilizadas pesquisas domiciliares de origem e destino. Já a escolha de rotas necessita de contagens volumétricas e de ocupação veicular para ser quantificada.

Definidas as variáveis, recomenda-se que o processo de modificação dos parâmetros aconteça primeiro no modelo de geração de viagens. Quando bem calibrados, deve-se partir para os parâmetros do custo generalizado. Ao fim, retorna-se para os modelos de geração de viagens e o ciclo prossegue até que o resultado de um modelo não esteja mais mudando significativamente os resultados do outro. Para calibrar o modelo de geração de viagens, recomenda-se que sejam comparadas as variáveis modeladas e coletadas que quantificam o elemento quantidade de viagens. Um maior valor modelado pode ser resultado de limites muito altos, assim como de elasticidades muito baixas e precisam ser analisadas caso a caso.

A comparação das variáveis do elemento divisão modal são úteis na calibração dos parâmetros da função de utilidade. Sempre que um modo possuir maior participação para todas as categorias de viagens do que o observado, recomenda-se a modificação do parâmetro *modal constant*. Quando essa diferença ocorrer apenas para um tipo específico de viagem, por exemplo, viagens motivo trabalho, ou viagens motivo outros, recomenda-se uma modificação do parâmetro *penal factor*. Por fim, quando essa prioridade ocorrer dentro do mesmo tipo de viagem, mas para um grupo sócio econômico distinto, deve-se alterar o parâmetro *tariff factor*.

Ao fim de cada ciclo de calibração de geração de viagens e do custo generalizado, recomenda-se a comparação das variáveis que representam a distribuição de viagens. Caso os valores modelados não estejam de acordo com os valores coletados isso indica uma falha nos fluxos econômicos, que precisa ser solucionada a partir de modificações dos coeficientes intersetoriais ou da distribuição espacial das atividades. Por fim, a comparação da variável que representa o elemento rota, deve também ocorrer ao fim da calibração dos dois modelos. Se os valores forem distintos é uma indicação de que a representação da rede pode possuir alguma limitação, como uma capacidade da via maior ou menor do que deveria, uma linha de transporte público inexistente ou incompleta, ou seja, problemas na representação da oferta do subsistema de transportes.

Com o modelo calibrado, os resultados podem ser utilizados para a compreensão da problemática. Os valores dos parâmetros serão úteis na compreensão de como os usuários dessa

região escolhem seus modos e definem a quantidade de viagens que irão realizar. Enquanto os custos compostos e as quantidades de viagens podem ser úteis no diagnóstico da relação entre acessibilidade e mobilidade de cada zona. Para realizar este diagnóstico, pode-se utilizar como indicador de acessibilidade o custo composto. Entretanto, o custo composto é uma matriz de custos, já que representa a acessibilidade entre cada par origem-destino. Portanto, utiliza-se a Equação 13 a seguir, para medir a acessibilidade de cada zona de origem de viagem, que é uma média ponderada das desutilidade compostas a partir da quantidade de viagens que partem de cada zona.

$$\tilde{c}_i^s = \frac{\sum_j \tilde{c}_{ij}^s * T_{ij}^s}{\sum_j T_{ij}^s} \quad (13)$$

Para representar a mobilidade, é proposta a utilização da quantidade de viagens que partem de cada zona. Entretanto, como o indicador de custo composto é relativo e representa o custo médio para cada viagem, então precisa-se também de um indicador relativo, logo não pode ser o total de viagens. Se for assumida uma análise para o período de pico da manhã, então a maior parte das viagens parte dos domicílios. E como a acessibilidade está sendo calculada para cada zona assumindo as origens dos deslocamentos, então a quantidade de viagens deve ser dividida pela quantidade de domicílios de cada uma das zonas. Se a categoria de viagens estiver relacionada apenas com o motivo da viagem, então a divisão da quantidade de viagens é pelo total de domicílios da zona. Caso a categoria represente também uma subdivisão socioeconômica, então os domicílios devem ser os pertencentes à respectiva subdivisão.

Caracterizados os dois indicadores pode-se agora partir para uma análise de diagnóstico. Para isso, foi proposta a utilização do ferramental de estatística espacial. A estatística espacial consiste no emprego de ferramentas analíticas de dados estatísticos relacionados a eventos geográficos para auxiliar o entendimento, o controle, a descrição ou a predição de dados espaciais. O objetivo principal é caracterizar padrões espaciais e possíveis associações espaciais entre os dados. Trata-se de um termo genérico para descrever as técnicas que se utilizam da informação sobre localização de um evento para melhor entender o processo que o gerou (Fotheringham e Rogerson, 2009).

Entre as ferramentas disponíveis de análise espacial, recomenda-se a utilização de mapas LISA, capazes de sobrepor as zonas significativamente diferentes tanto no que diz respeito à acessibilidade, quanto à mobilidade. Dessa forma são criadas quatro classes de interesse. Primeiro, aquelas com baixa mobilidade e acessibilidade. Segundo, aquelas com alta

mobilidade e acessibilidade. Terceiro, aquelas com baixa mobilidade e alta acessibilidade. Por último, aquelas com alta mobilidade e baixa acessibilidade. Ao se analisar esses mapas, já que deve ser criado um mapa para cada categoria de transportes, pode-se verificar as relações de dependência entre os dois elementos. Se em todos os mapas existirem prioritariamente áreas do primeiro e segundo tipos, é um indicativo de que acessibilidade e mobilidade na área em estudo estão diretamente relacionados. Caso as zonas sejam prioritariamente do terceiro e quarto tipos, então a relação entre esses elementos é inversamente proporcional. Se ocorrer uma heterogeneidade entre esses tipos, então não é possível afirmar que existe dependência espacial.

4.2.6 Organização das bases de dados

Como a organização da base de dados do método proposto é uma consolidação das necessidades de informações adicionais para que seja aplicado, ela está sendo apresentada no final da seção, diferentemente do que aconteceu na seção dos métodos convencionais de calibração.

As pesquisas origem-destino foram fonte de coleta de dados na aplicação de Belo Horizonte no Brasil, da região de Norte-Passo-de-Calais na França e de Oregon nos Estados Unidos. Essas pesquisas foram principalmente utilizadas como fonte de dados para a calibração dos modelos de transportes e do modelo de interface. Não há dúvida sobre a contribuição que esse tipo de pesquisa pode dar para a calibração desses modelos. Entretanto, a inserção de algumas questões a mais podem ser úteis na calibração dos modelos de uso do solo.

Se forem inseridos questionamentos sobre a área que a residência ocupa, quantas outras unidades comerciais existem na edificação, e o valor pago de aluguel, já será possível avaliar o espaço ocupado de cada unidade habitacional, permitindo assim a calibração das funções de demanda por solo. Além disso, reconhecer o tipo de solo ocupado permitirá identificar relações entre setores transportáveis e não-transportáveis que não costumam ocorrer, por exemplo, uma residência ocupando um solo considerado comercial. Dessa forma, será possível avaliar de forma desagregada as relações entre esses setores e calibrar com melhor precisão os parâmetros de penalidades das funções de substitutos.

Nestas pesquisas, nem sempre existe a atividade que era realizada na origem. A inserção deste questionamento, poderá a identificar o tipo de relação que existe entre os setores. Como visto no Capítulo 3, atividades no destino similares e atividades na origem distintas geram relações diferentes, logo é importante a informação sobre o que indivíduo estava realizando na origem. Conhecer essas relações irá permitir a calibração dos coeficientes técnicos da forma

como foi aqui proposto. Ressalta-se que essas informações podem vir de outras fontes, como informações sobre o consumo das famílias, que podem auxiliar na calibração dos coeficientes do Tipo 3. Enquanto informações que relacionem o salário dos funcionários com as categorias de trabalho irão auxiliar na calibração dos coeficientes do Tipo 4.

4.3 Considerações finais

Os métodos apresentados certamente possuem também suas limitações. Além disso, poderiam ter se utilizado mais dos métodos de calibração das funções de utilidade, como a calibração por máxima verossimilhança através de pesquisas de preferência declarada ou revelada. Neste trabalho, apenas a função do custo generalizado foi sugerida para ser calibrada dessa forma, mas a modelagem do TRANUS é predominantemente baseada em modelos de escolha discreta. Apesar dessas limitações, o objetivo específico de que trata este capítulo é desenvolver uma proposta metodológica de calibração que permita uma adequada compreensão da problemática. Neste sentido, mesmo reconhecendo que os processos podem ainda ser melhorados, entende-se que o que foi aqui proposto atende ao objetivo, já que todas as propostas buscaram incorporar os significados dos parâmetros, o que garantirá que os resultados desta calibração poderão ser utilizados na compreensão do fenômeno.

No começo deste capítulo, foi apresentada uma proposta metodológica de calibração que foi aplicada em Oregon. Nesse método, os autores aplicam três ciclos de calibração, mas dois deles podem ser melhor compreendidos como métodos de validação. Assim como a calibração, os objetivos da validação também devem estar voltados para a compreensão da problemática. Entre os métodos de validação pode-se citar: modificação dos dados de entrada para que representem uma realidade temporal (validação histórica) diferente daquela em que ocorreu a calibração (Wegener, 2004); através da utilização de um conjunto de medidas de desempenho que não tenham sido utilizadas no processo de calibração (Cambridge Systematics, 2010); e ainda através da validação com especialistas, ou com análises de incerteza e de sensibilidade (Bonnel *et al.*, 2014). Dados esses conceitos é reconhecida a necessidade de se propor e aplicar um método de validação antes da utilização desses modelos, seja na fase de compreensão da problemática, ou na fase de avaliação de alternativas do processo de planejamento urbano.

5 CALIBRAÇÃO DO TRANUS PARA FORTALEZA

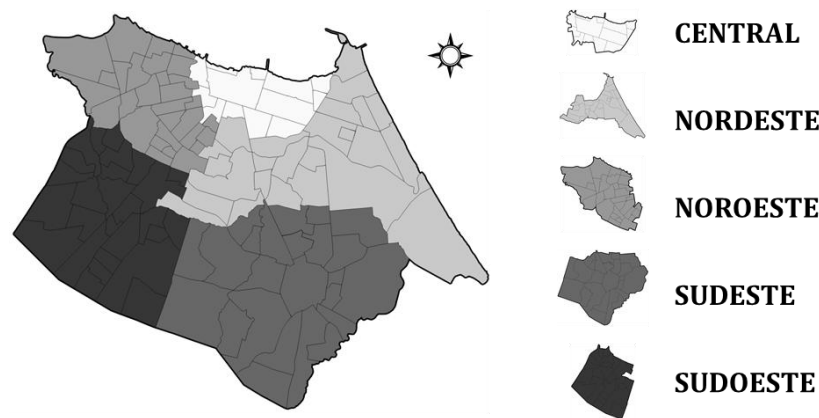
Este capítulo trata do quarto objetivo específico: demonstrar a aplicabilidade do método de calibração proposto, a partir de um estudo de caso da cidade de Fortaleza. As discussões a seguir focam em descrever a calibração do TRANUS para Fortaleza, a partir do método do Capítulo 4. E apresentará também como os resultados da calibração são úteis para a compreensão da problemática urbana.

Como não há uma problemática pré-definida serão discutidos os indicadores que representam as medidas de impacto e de desempenho dos três subsistemas urbanos. Ao focar na análise destes dois tipos de indicadores, assume-se que problemas importantes do fenômeno urbano podem ser quantificados por eles. As medidas de desempenho auxiliam na compreensão de problemas resultantes do desequilíbrio entre a demanda e a oferta dos subsistemas, como o desemprego (atividades), o déficit habitacional (uso do solo) e a superlotação do transporte público (transportes). E as medidas de impacto podem representar problemas de um sistema cuja causa esteja em outro, por exemplo: as elevadas distâncias percorridas por moradores de conjuntos habitacionais para chegarem ao trabalho representam o impacto do uso do solo sobre os transportes; já a expulsão da população carente de uma região após a readequação viária da área pode representar o impacto dos transportes sobre o uso do solo; ou ainda o abandono de construções e terrenos por empresas de construção civil ao passarem por crises financeiras representa o impacto das atividades sobre o uso do solo.

Nas análises, serão referenciadas às cinco regiões da Figura 34, que subdividem a cidade em suas áreas geográficas, com exceção da região central. Tal área é um conjunto de bairros circundados pelo primeiro anel viário expresso e onde estão localizados os centros histórico, econômico e financeiro e a administração pública municipal, por isso optou-se por analisá-la separadamente das demais regiões. Essas áreas serão utilizadas apenas durante as análises, mas não são as zonas de tráfego utilizadas na modelagem.

Este capítulo segue com a apresentação da organização da base de dados (seção 5.1), onde são discutidas as decisões iniciais da modelagem, assim como as informações e fontes utilizadas no processo de calibração. A descrição da calibração, discussão dos indicadores de desempenho e de impacto ocorre nas seções seguintes seguindo a ordem de calibração dos modelos: modelos de atividades (seção 5.2), modelos de uso do solo (seção 5.3), modelo de interface (5.4) e modelos de transportes (seção 5.5). Finaliza-se com uma seção de considerações finais (seção 5.7) onde são discutidas as contribuições fenomenológicas dos resultados deste capítulo.

Figura 34 - Regiões de análise



Fonte: Elaborado pelo autor

5.1 Organização das bases de dados

Como não há uma problemática a ser analisada, não tem como utilizá-la na delimitação da aplicação. Dessa forma, a aplicação foi pensada de tal forma que fosse complexa o suficiente para se atingir o objetivo geral deste trabalho de avaliar a capacidade da calibração em auxiliar na compreensão da problemática. Pensando nisso, foram definidos como fenômenos de interesse as decisões locais de domicílios e de empregos para o intervalo de 1 ano, definido como o ano de 2015. Os domicílios foram subdivididos por classes de renda e os empregos por tipos de atividades econômicas (por exemplo, comércio e prestação de serviços), assumindo assim que cada tipo possui peculiaridades ao realizar decisões locais e de interação de atividades, que são os setores transportáveis dos modelos de atividades e de uso do solo. Quanto aos modelos de transporte, o interesse é compreender o padrão de deslocamentos da população, com foco nos que ocorrem por motivos trabalho ou educação e que ocorrem por modos motorizados. Esses deslocamentos serão analisados para uma hora de pico típica do ano de 2015, considerando assim que a acessibilidade estimada neste período é o que influencia as decisões locais de todo o ano.

Assim como as decisões a serem modeladas precisam estar relacionadas com a problemática, o zoneamento também possui esta peculiaridade. Na falta dela, optou-se por utilizar um zoneamento baseado nos 119 bairros da cidade, assumido que existe uma pequena quantidade de viagens de interesse com origem e destino no mesmo bairro e que a oferta de transporte (malha viária e rede de transporte público) dentro de cada bairro é homogênea. Quanto ao uso do solo, assume-se que o padrão espacial de ocupação de cada bairro ocorre de

forma homogênea sem que os setores possuam interesses em determinadas partes destes bairros. Outro fator que contribuiu para escolher os bairros como unidades de zoneamento foram os dados disponíveis que são disponibilizados neste nível de agregação espacial em sua maioria.

Reconhece-se a necessidade de integrar nesta análise cidades da região metropolitana de Fortaleza, mas que não agregariam ao objetivo deste trabalho, já que as análises realizadas não tentam discutir a realidade de Fortaleza, mas apenas de explicitar como a calibração ajuda a compreendê-la. Entretanto, numa aplicação fenomenológica, com problemática bem definida, é importante a inclusão de cidades vizinhas à Fortaleza, como Caucaia, Maracanaú, Eusébio e Aquiraz, que possuem suas atividades econômicas diretamente relacionadas com as atividades desenvolvidas na capital cearense.

Na calibração, foram utilizadas informações das mais diversas fontes. A Tabela 7 a seguir lista essas bases de dados, suas respectivas fontes, os anos as quais se referem, assim como os modelos em que foram utilizados. Ao longo das próximas sessões, elas serão referenciadas e seu papel na calibração apresentado.

Tabela 7 - Bases de dados utilizadas para a calibração

Base de Dados	Fonte	Ano	Aplicação	Referência
Relação Anual de Informações (RAIS)	Ministério do Trabalho e Emprego (MTE)	2014	MA / MUS	
Censo Escolar do Ensino Básico	Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira (INEP)	2015	MA / MUS	
Censo do Ensino Superior	Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira (INEP)	2015	MA / MUS	
Cadastro dos Programas de Pós-Graduação	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES)	2015	MA / MUS	
Censo de 2010	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)	2010	MA / MUS	
Projeções e estimativas da população do Brasil e das Unidades da Federação	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)	2015	MA / MUS	
Pesquisa de Orçamento Familiar (POF)	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)	2008 2009	MA	
Cadastro do Imposto sobre a Propriedade Predial e Territorial Urbana (IPTU)	Secretaria de Finanças de Fortaleza (SEFIN)	2015	MUS	
Validações do Sistema de Bilhetagem Eletrônica do Transporte Público Rodoviário de Fortaleza	Empresa de Transporte Urbano de Fortaleza (Etufor)	2014	MT	

Base de Dados	Fonte	Ano	Aplicação	Referência
Contagens volumétricas de laços magnéticos de semáforos ligados ao Controle Semafórico Centralizado Adaptativo em Tempo Real (SCOOT)	Autarquia Municipal de Trânsito e Cidadania (AMC) de Fortaleza	2014	MT	
Contagens volumétricas de equipamentos de fiscalização eletrônica	Atlanta	2014	MT	
Contagens volumétricas de equipamentos de fiscalização eletrônica	Trana	2014	MT	
Contagens volumétricas de equipamentos de fiscalização eletrônica	Fotossensores	2014	MT	
Pesquisa Screen Line	Fundação Cearense de Pesquisa e Cultura (FCPC)	2015	MT	

MA: Modelo de Atividades
MUS: Modelos de Uso do Solo
MT: Modelos de Transportes

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2 Modelo de atividades

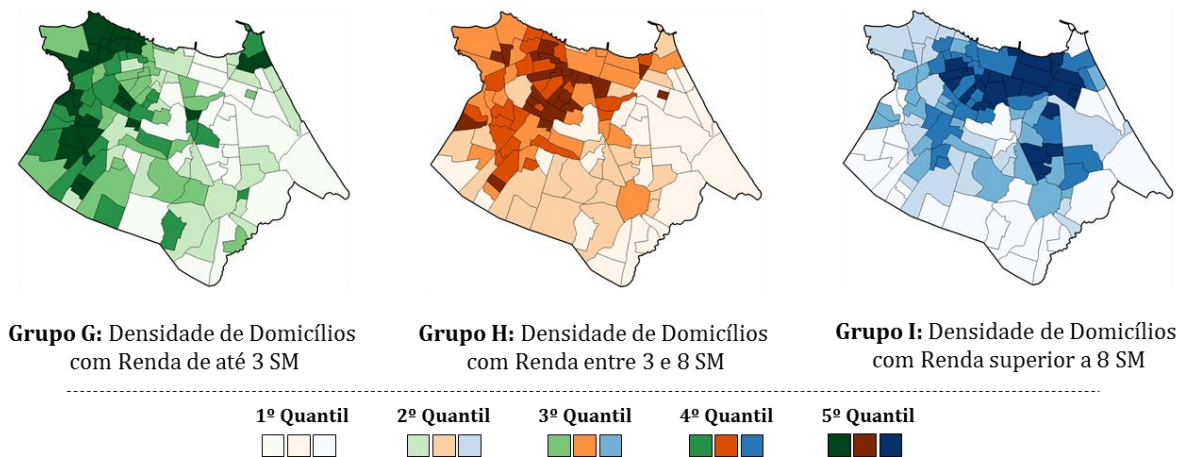
5.2.1 Calibração

A calibração dos modelos de atividades depende inicialmente da definição de quais são os setores transportáveis. Para representar as atividades produtivas foram definidos seis tipos de setores: A) Setor Primário, B) Setor Industrial, C) Administração Pública, D) Comercial, E) Serviços e F) Educacional. Os cinco primeiros serão quantificados pela quantidade de empregos, a partir da agregação da Classificação Nacional de Atividades Econômicas (CNAE) utilizada pela RAIS (MTE, 2014). O setor educacional será representado pela quantidade de matrículas, obtidas de três fontes: Censo Escolar do Ensino Básico de 2015 do INEP; Censo do Ensino Superior de 2015 também do INEP; e o cadastro dos Programas de Pós-Graduação no ano de 2015 da CAPES.

Os setores transportáveis populacionais foram definidos como sendo de 3 tipos: G) Domicílios de até 3 Salários Mínimos (SM), H) Domicílios entre 3 e 8 SM, I) Domicílios acima de 8 SM, obtidos pelo Censo de 2010 (IBGE, 2010) e atualizados para o ano de 2015, seguindo projeções do próprio órgão (IBGE, 2015). Essas classes foram escolhidas por possuírem padrões de ocupação distintos, como pode ser visto na Figura 35. O grupo G está mais

localizado a noroeste e sudoeste da cidade, enquanto o grupo H está mais presente na região noroeste e possui forte presença também na região central. Por fim, o Grupo H está mais concentrado na região central e nordeste da cidade, consolidando assim padrões distintos de ocupação territorial entre essas três classes de domicílios.

Figura 35 - Padrões de ocupação territorial das classes de domicílio



Fonte: Elaborado pelo autor.

Fonte dos Dados: IBGE (2010, 2015) e IBGE (2015)

Os setores considerados exógenos foram: A) Setor Primário, B) Setor Industrial e C) Administração Pública. O primeiro por possuir poucos empregos e estar em declínio, por conta da urbanização, sendo responsável por menos de 1% dos empregos da cidade. O segundo por estar localizado principalmente em alguns bairros das regiões nordeste e noroeste e ser de produtos para exportação na sua maior parte. O último grupo por que Fortaleza é também a sede do governo estadual e de muitos órgãos federais o que caracteriza uma demanda externa por ele.

Os coeficientes técnicos que representam a demanda pelos setores exógenos, ou seja, os coeficientes do Tipo 1 da Figura 36 são nulos segundo a proposta metodológica discutida no Capítulo 4. Foram definidos nulos os coeficientes do Tipo 2, que relacionam os setores de atividades produtivas. Tais relações geram deslocamentos de cargas, que não são o foco dessa aplicação. Os coeficientes do Tipo 5 também foram anulados, pois representam as relações pessoais dos indivíduos, que também não são objetivos desta análise, já que o foco principal é na geração das viagens à trabalho e educação. Dessa forma, restaram 33 coeficientes a serem calibrados, 9 do Tipo 3 e 24 do Tipo 4.

Figura 36 - Tipos de coeficientes técnicos para Fortaleza

	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	(F)	(G)	(H)	(I)
(A)									
(B)					1				
(C)									
(D)									
(E)								3	
(F)									
(G)									
(H)									5
(I)									





Fonte: Elaborado pelo autor.





Os coeficientes do tipo 3 que relacionam os setores populacionais com os setores de comércio e de serviços foram calibrados com a utilização da POF de 2008-2009, realizada pelo IBGE, que indica o valor gasto por domicílio em cada tipo de atividade. Foi obtido, por exemplo, que domicílios de renda mais baixa gastam mensalmente R\$ 417,00 com serviços e R\$ 566,00 com comércio, assim como apresentado no item 1 da Figura 37. Essas informações não estão nas unidades que representam os setores, logo são dados indiretos para a definição dos coeficientes técnicos. Como são conhecidos os totais de domicílios pelos dados do Censo, então é possível saber que os 455.000 domicílios de renda mais baixa gastam aproximadamente R\$ 257 milhões de reais com o comércio e R\$ 190 milhões com serviços, como apresentado no item 2 da Figura 37. Como o dado é indireto, é necessário assumir alguma premissa de relação entre as unidades dos dados e as unidades dos setores.



Neste caso, a premissa é a de que a relação monetária desses setores é a mesma da relação de quantidade de empregos, ou seja, R\$ 1,00 gasto por domicílios de renda mais baixa gera a mesma quantidade de empregos que R\$ 1,00 gasto por domicílios de renda mais alta. Essa premissa poderia ser melhorada caso fossem informadas a quantidade de produtos comprados por cada grupo populacional, pois sabe-se que os domicílios de renda mais alta tendem a comprar produtos com valor agregado mais elevado. Dessa forma, a geração de empregos deve

ser menor para cada R\$ 1,00 gasto do grupo de renda mais alta, do que do grupo de renda mais baixa. Entretanto, com os dados disponibilizados, não é possível aferir o quão maior ou menor são essas taxas, portanto seguiu-se utilizando esta premissa. Sendo assim, as proporções de gastos em cada tipo de atividade (item 3) podem ser compreendidas como percentuais de empregos.

Figura 37 - Calibração dos coeficientes técnicos do tipo 3 em Fortaleza

1. Valor gasto por tipo de atividade (R\$) por domicílio					4. Empregos				
	\$	\$\$	\$\$\$	(X^m)		\$	\$\$	\$\$\$	
	566	1311	1898	314000		126000	103000	85000	314000
	417	1461	4257	671000		154000	195000	322000	671000
(X^n)	455000	162000	93000						

2. Valor total gasto por tipo de atividade (milhões de R\$)				5. Coeficientes Intersetoriais (a^{mn})			
	\$	\$\$	\$\$\$		\$	\$\$	\$\$\$
	257	212	177		0,277	0,636	0,914
	190	236	397		0,338	1,204	3,462

3. Percentual por atividade				
	\$	\$\$	\$\$\$	
	40%	33%	27%	100%
	23%	29%	48%	100%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Fonte dos Dados: IBGE (2009, 2010, 2015) e MTE (2014)

Sabendo dos totais de empregos em cada setor da atividade, a partir da RAIS do MTE de 2014, é possível identificar os empregos por setor gerados por cada grupo populacional de renda), ao se multiplicar o total de empregos pelos percentuais do item 3. Por exemplo, observa-se que 126 mil empregos comerciais são originados por domicílios de renda mais baixa (item 4). Por fim, aplicando a Equação 10 do método proposto são obtidos os coeficientes técnicos (item 5). A aplicação da Equação 10 apenas esquematiza o seguinte questionamento para cada par de setores: se existem 126 mil empregos comerciais sendo produzidos por 455 mil domicílios de baixa renda, então quantos empregos são produzidos por cada domicílio de baixa renda?

Pela calibração, verifica-se que a existência de um domicílio de qualquer tipo irá gerar mais empregos de serviços, do que empregos comerciais, entretanto, domicílios de renda mais alta tendem a atrair quase quatro vezes mais empregos de serviços do que empregos comerciais, enquanto essa proporção para domicílios de renda mais baixa não chega a 1,5. Entre as rendas, essa relação é de mais de dez vezes maior para o setor de serviços, o que pode ser consequência da premissa assumida anteriormente de que R\$ 1,00 gasto gera a mesma quantidade de empregos, independentemente da renda.






A calibração dos parâmetros do Tipo 4, desconsiderando o consumo do setor educacional, também ocorreu de forma indireta já que as relações da RAIS tratam de empregos por tipo de atividade, enquanto o que se deseja são domicílios por tipo de atividade. Neste caso, a premissa assumida foi que um emprego, independentemente do tipo, sempre atrairá a mesma quantidade de domicílios. Essa premissa deixará de ser válida nas situações onde o indivíduo de renda mais baixa que trabalha no setor comercial possuir uma composição familiar distinta do indivíduo que trabalha no setor comercial. Apesar da composição familiar não ser homogênea dentro da mesma classe de renda, não há indícios para Fortaleza de que o tipo de emprego do indivíduo impacta na sua composição familiar.

O resumo da calibração é apresentado na Figura 38. Internamente à matriz do item 1, está expressa a quantidade amostral de empregos por renda domiciliar e por setor de emprego obtidos pela RAIS. Esses valores passaram pelo mesmo procedimento da Figura 37 até chegar ao item da 5, onde estão expressos os coeficientes. Pelos valores dos parâmetros, percebe-se que quase todos os empregos atraem entre 0.3 e 0.4 domicílios de renda mais baixa, com exceção dos empregos da administração pública, que é o principal tipo de emprego que atrai a população de renda média e de renda alta. Como em Fortaleza existe uma concentração de empregos da administração pública municipal, da administração pública estadual e também de órgãos federais, como polícia federal e universidades federais e esses setores notadamente remuneram bem seus funcionários, então faz sentido que as classes mais altas sejam atraídas por esse tipo de emprego.






Nos demais setores, a relação entre geração de domicílios de baixa renda e de alta renda chega a ser maior que 28 vezes, no caso dos empregos comerciais. Apesar de muito elevada, espera-se essa prioridade na geração de domicílios de baixa renda. No setor comercial, grande parte dos funcionários das empresas são remunerados com apenas um salário mínimo, é o caso de vendedores, empacotadores, carregadores, por exemplo. Funcionários que recebem mais de 8 salários mínimos, ou seja, mais de R\$ 7.040, são uma minoria quando comparados ao corpo de funcionários dessas empresas.

Figura 38 - Calibração dos coeficientes técnicos do tipo 4 em Fortaleza

1. Pessoas Empregadas por Tipo de Serviço

						(X ^m)
\$	925	92207	33508	101866	213005	455000
\$\$	140	7250	33148	5948	26468	162000
\$\$\$	147	3199	18563	1396	16086	93000
(X ⁿ)	3000	163000	148000	314000	671000	

5. Coeficientes Intersetoriais (a^{mn})

					
\$	0,309	0,350	0,155	0,398	0,338
\$\$	0,115	0,068	0,379	0,057	0,104
\$\$\$	0,130	0,032	0,227	0,014	0,067



Fonte: Elaborado pelo autor.

Fonte dos Dados: IBGE (2010, 2015) e MTE (2014)



Por fim, faltam ser calibradas as relações que incluem o setor educacional. No item 1 da Figura 39, estão expressos os dados indiretos utilizados na calibração dos coeficientes do tipo 3 e 4 que envolvem o setor educacional.

Figura 39 - Coeficientes técnicos que envolvem o setor Educacional

1. Dados Indiretos

		\$	\$\$	\$\$\$	(X ^m)
	-	868000	259000	126000	774000
\$	23000	-	-	-	455000
\$\$	7000	-	-	-	162000
\$\$\$	5000	-	-	-	93000
(X ⁿ)	774000	455000	162000	93000	

5. Coeficientes Intersetoriais (a^{mn})

		\$	\$\$	\$\$\$
	-	1,178	0,989	0,836
\$	0,030	-	-	-
\$\$	0,009	-	-	-
\$\$\$	0,006	-	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores indiretos da calibração dos coeficientes do tipo 3 (expressos na primeira linha da matriz do Item 1) representam a quantidade de pessoas com idade entre 0 e 24 anos em cada setor populacional, obtida através do Censo de 2010 do IBGE. A premissa assumida nesta calibração é que um jovem de classe alta gera a mesma quantidade de matrículas que um jovem de classe mais baixa. Em Fortaleza, em 2010, mais de 92% das pessoas entre 4 e 17 anos estavam matriculados em alguma instituição de ensino, segundo o portal Todos pela Educação. Portanto, essa premissa é satisfatoriamente atendida para o ensino básico. No ensino superior,

essa realidade é diferente, mesmo com a adoção de cotas para indivíduos de classes de renda mais baixas, o percentual deve ser bem menor e deve dar prioridade aos indivíduos de classes de renda mais alta. Entretanto, as matrículas de ensino básico representam mais de 85% de todas as matrículas consideradas nesta análise, o que permite aceitar a premissa e continuar a análise.

Já os valores indiretos utilizados na calibração dos coeficientes do tipo 4 (expressos na primeira coluna da matriz do Item 1) representam a quantidade de empregos do setor educacional em cada faixa de renda populacional. Esse total de empregos foi obtido através dos censos do ensino básico e do ensino superior do INEP de 2014. A distribuição entre as classes de renda assumiu que os empregos do setor educacional se portam da mesma forma que os empregos do tipo serviços, observada na RAIS, já que o setor educacional é um subtipo dos empregos de serviços. Neste caso, a premissa adotada é similar aos dos demais coeficientes do tipo 4.

Com os parâmetros calibrados, percebe-se que o consumo do setor educacional, aqui representado por quantidade de matrículas, é mais forte para cada domicílio de baixa renda. Isso ocorre porque nesses domicílios existe uma maior quantidade de pessoas, em especial de jovens. Os domicílios de renda mais baixa possuem 1.9 pessoas entre 0 e 24 anos por domicílio, enquanto os domicílios de renda mais alta possuem apenas 1.4, segundo o Censo de 2010. A demanda gerada pelo setor educacional é também maior pelos domicílios de renda mais baixa, relação essa que é similar ao do setor de serviços e suscetível a mesma análise.

5.2.2 Medida de desempenho: coeficientes intersetoriais

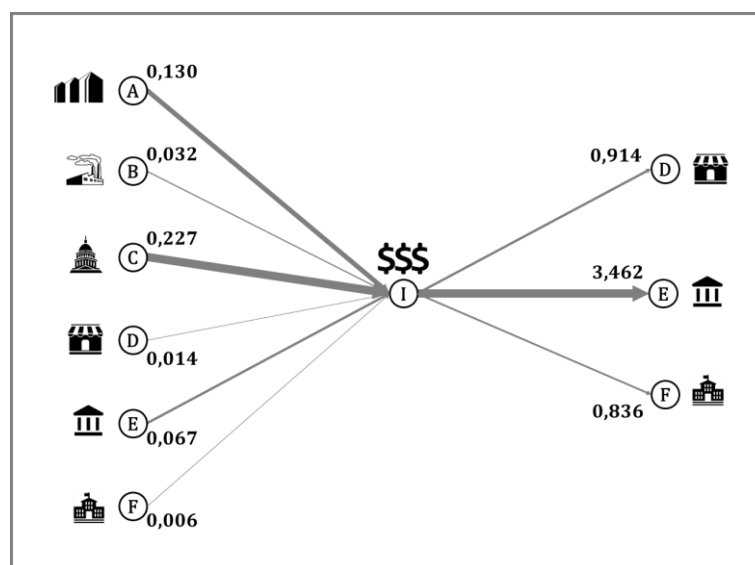
Os coeficientes intersetoriais são fundamentais para a modelagem integrada do TRANUS, pois são eles que definem como ocorrem as relações entre os setores, ponto inicial da modelagem das decisões de localização de atividades e de viagens. Dada essa capacidade de relacionar setores, existem relações causais entre problemas do subsistema de atividades que podem ser quantificadas com sua utilização. Um exemplo delas seria a avaliação de como o fechamento de uma rede de lojas (setor comercial) pode impactar no desemprego da região (setores populacionais); ou ainda, como que a migração da população mais rica (setores populacionais) pode impactar na demanda por empregos (setores produtivos).

Foram dispostos na

Figura 40 os coeficientes relacionados com a população de renda mais alta, definida como Setor I. Por estas relações percebe-se que a redução de empregos de uma rede de lojas (Setor

D) pouco interfere nos domicílios de alta renda (setor I). Entretanto, uma redução dos empregos ofertados pelo poder público (Setor C) possuirá um forte impacto neste grupo populacional com melhores condições financeiras. Por sua vez, se 100 domicílios do Setor I se mudarem para outra cidade existirá um impacto direto em mais de 500 empregos, sendo o setor de prestação de serviços o mais afetado, com mais de 340 empregos influenciados.

Figura 40 - Representação dos coeficientes intersetoriais que envolvem o Setor I



Fonte: Elaborado pelo autor.

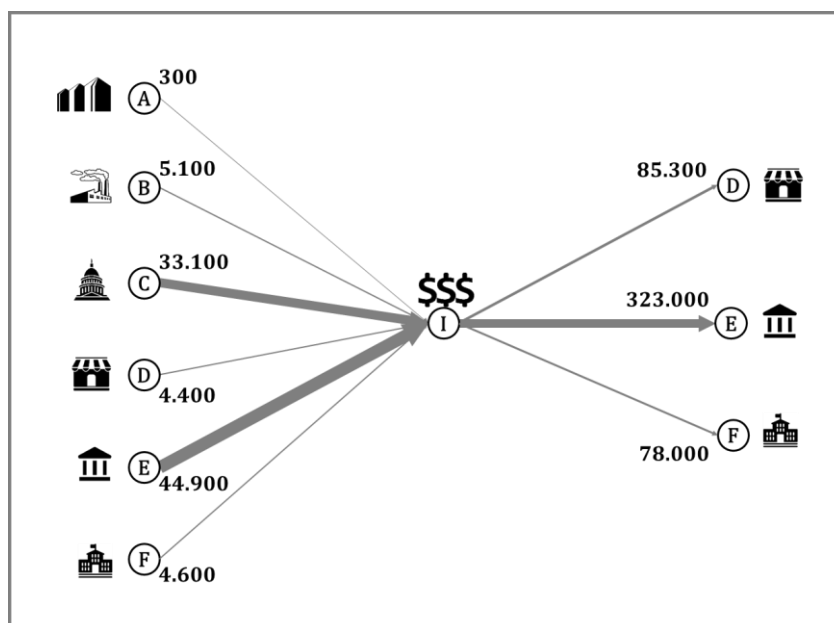
5.2.3 Medida de impacto: fluxos econômicos

Os fluxos econômicos são o resultado da interação entre os resultados dos modelos de uso do solo e das atividades. Esses fluxos são espacializados e representam a interação entre distintos setores transportáveis. Seu elevado grau de desagregação permite sua manipulação de tal forma que é possível separar o que é o impacto das atividades, definido por Lopes (2014) como “participação em atividades” e qual é o impacto do uso do solo, definido por Lopes (2014) como “distribuição espacial das atividades”.

Para representar a distribuição de atividades os fluxos econômicos precisam ter seu aspecto espacial suprimido, como exemplificado na Tabela 4. Dessa forma, pode-se observar quais são os setores que mais contribuem para a instalação de outro setor. Diferentemente da discussão realizada com a Figura 40, a distribuição de atividades deve incorporar na análise as quantidades absolutas de cada setor, como realizado na Figura 41. Percebe-se que nesta relação o setor de prestação de serviços (Setor E) e o setor da administração pública (Setor C) são indutores de 78.000 domicílios de alta renda, o que representa mais de 75% de todos os

domicílios desta classe. A importância do setor primário (Setor A) evidenciada anteriormente agora já não aparece, pois apesar de cada emprego induzir muitos domicílios de alta renda, a quantidade de empregos deste tipo é pequena; enquanto que a indução por cada emprego de prestação de serviços é baixa, mas a quantidade elevada de empregos deste tipo faz com que a relevância desse setor aumente nesta análise.

Figura 41 - Distribuição de atividades das relações que envolvem o setor populacional de maior renda



Fonte: Elaborado pelo autor.

Realizar a análise focada em outros setores transportáveis permitirá uma melhor compreensão desse fenômeno aos analistas e planejadores. Entretanto foge ao escopo deste trabalho realizar uma análise exaustiva destes setores, uma vez que o objetivo é apenas apresentar como que esses indicadores podem ser úteis a esta função.

5.3 Modelos de uso do solo

5.3.1 Calibração

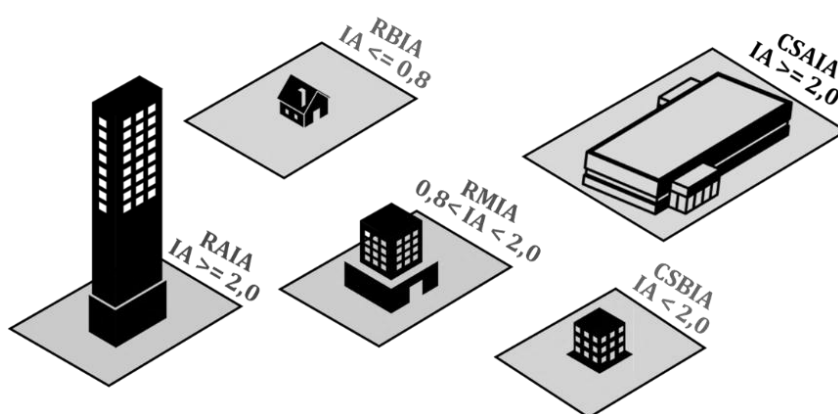
No que concerne à modelagem do consumo de solo, os setores A) Setor Primário e C) Administração Pública foram excluídos desse processo, ambos por terem localizações e tamanhos estáticos ao longo do tempo. Para os demais, foram considerados sete opções de tipo

de solo para serem consumidos: 1) Industrial - IND; 2) Comercial e de Serviços de Baixo Índice de Aproveitamento - CSBIA; 3) Comercial e de Serviços de Alto Índice de Aproveitamento - CSAIA; 4) Residencial de Baixo Índice de Aproveitamento - RBIA; 5) Residencial de Médio Índice de Aproveitamento - RMIA; 6) Residencial de Alto Índice de Aproveitamento - RAIA; e 7) Assentamento Precário - AP.

A partir do cadastro do IPTU de 2015, fornecido pela SEFIN de Fortaleza, foi identificado o uso de cada lote e seus respectivos índices de aproveitamento (IA), utilizados para subdividir o solo de cada zona. Para solos do tipo residencial, foram utilizados IA capazes de separar as casas, de edifícios pequenos, dos edifícios maiores, por isso foram utilizados como limites os índices 0,8 e 2,0, assim como apresentado pela

Figura 42. Já para comércios e serviços, a subdivisão apenas tentou separar as grandes edificações comerciais e de serviços da cidade, utilizando como índice divisor o valor de 2,0.

Figura 42 - Índices de aproveitamento para classificação dos setores



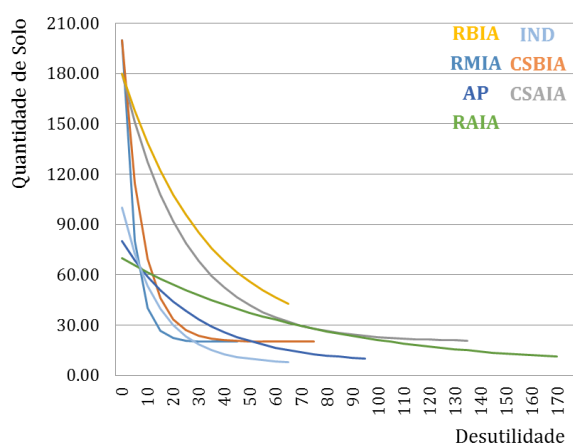
Fonte: Elaborado pelo autor.

Para os setores transportáveis do tipo B) Setor Industrial, D) Comercial e E) Serviços considerou-se que eles ocupam qualquer tipo de solo. Já os setores populacionais G, H e I não utilizam o solo do tipo industrial, mas podem ocupar os demais. O processo de calibração foi iniciado com a obtenção dos valores mínimos e máximos de consumo de solo por meio da base do IPTU. Em seguida, as elasticidades e penalidades iniciais foram definidas a partir da verificação das curvas de funções elásticas e de substitutos. A Figura 43 e a Figura 44 retratam essas curvas para o consumo de solo do setor industrial.

Com as funções visualmente ajustadas, elas foram inseridas no método de otimização discutido no Capítulo 4, em seguida, colocadas na plataforma para que gerassem os preços sombra. Foram necessários alguns ajustes manuais, principalmente nos preços do solo, já que

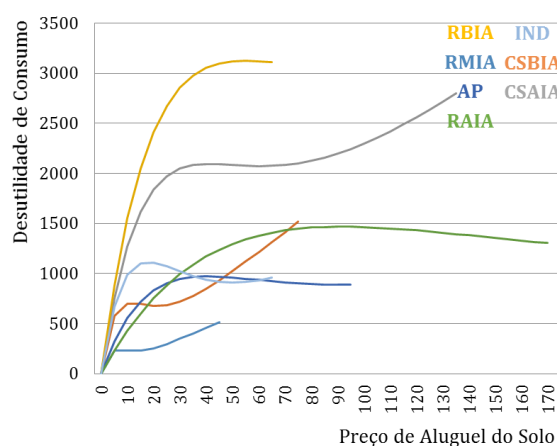
esses são modelados pela SEFIN e não coletados. A cada ajuste de preço de solo foi necessária uma nova execução do procedimento de otimização. Ao fim, os parâmetros estimados geraram os preços sombras da Figura 45 e da Figura 46. Os preços sombras dos setores não transportáveis apresentaram ajustes baixos, que chegam no máximo a 18% em média no caso do solo do tipo CSBD, o que foi considerado satisfatório. Todos os preços possuem valores médios de preços sombra positivos, indicando que grande parte das zonas precisou ter um aumento no preço para que o consumo fosse reduzido. Os preços sombra dos diversos tipos de solos apresentam ainda um comportamento similar de dispersão, o que indica um comportamento similar entre as zonas da análise independentemente do tipo de solo.

Figura 43 - Demanda elástica de solo para o Setor B



Fonte: Elaborado pelo autor.

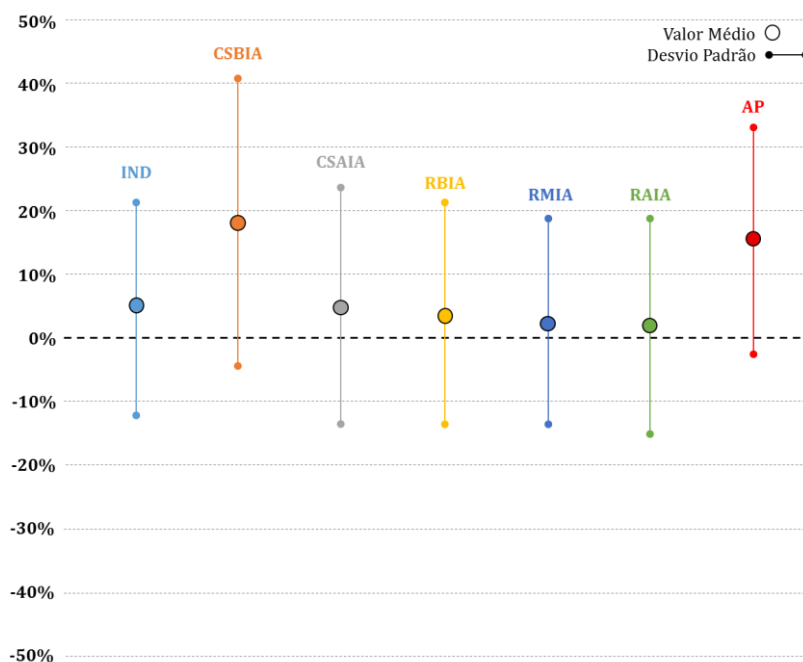
Figura 44 - Decisão de substitutos para o Setor B



Fonte: Elaborado pelo autor.

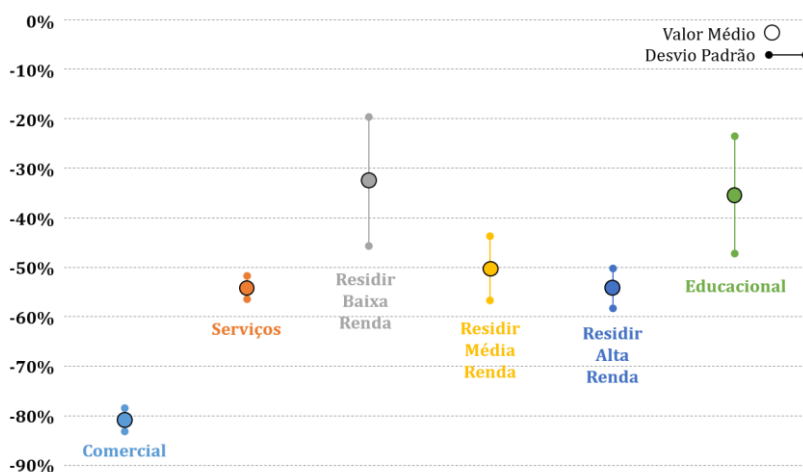
Já os preços sombra dos setores transportáveis apresentam um desvio padrão de no máximo 13%, o que também foi considerado satisfatório dentro dos limites estabelecidos pelo método, indicando que o modelo de decisão locacional está bem calibrado, ou seja, os preços sombra pouco interferem nas decisões locacionais ficando essa função apenas para o preço do solo coletado e para a desutilidade de transportes. Todos esses preços tiveram uma média negativa, indicando que foi necessário reduzir consideravelmente o preço das atividades para que ocorresse o consumo. Esse tipo de comportamento sugere uma redução do parâmetro “ λ^m ”, responsável por indicar a importância do preço do solo, em comparação à desutilidade de transportes. Entretanto, esse parâmetro foi mantido com o valor padrão de um, pois o método proposto recomenda sua modificação a partir de duas observações do padrão de distribuição espacial dos setores ao longo do tempo, o que não foi possível de ser obtido.

Figura 45 - Médias e desvios padrões dos preços sombras de setores não transportáveis



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 46 - Médias e desvios padrões dos preços sombras de setores transportáveis

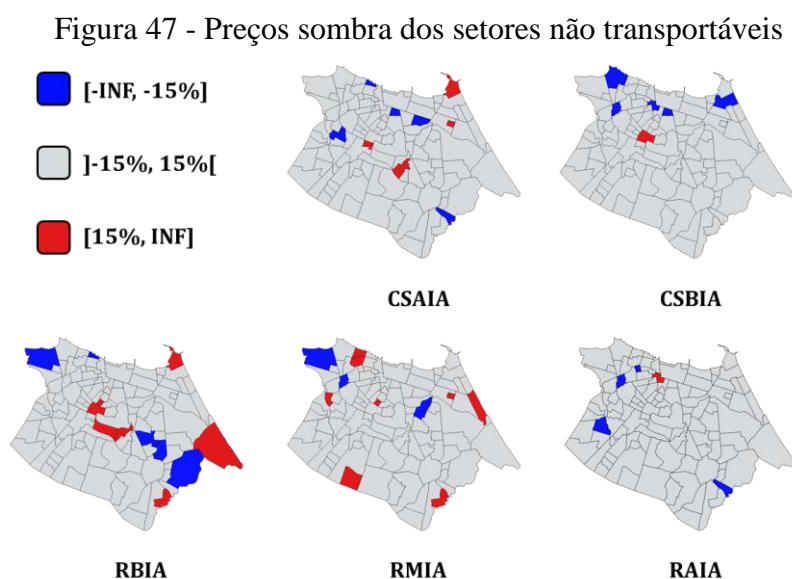


Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3.2 Medida de desempenho: preço sombra

Avaliar o preço sombra de forma agregada pode ser suficiente para calibrar os parâmetros; entretanto, avaliar espacialmente esse indicador poderá gerar mais informações sobre o fenômeno. A Figura 47 apresenta as zonas com preços sombras acima de 15% e abaixo de -

15% para cinco tipos de solo. Percebe-se que mesmo estando calibrado, o modelo ainda precisa corrigir determinadas zonas de maneira mais enfática, afinal todas as zonas possuem preços sombras para que se comportem de acordo com os dados coletados. Nas zonas que precisam deste ajuste mais agressivo existe um indicativo de que a acessibilidade e o valor do solo coletado em campo não são suficientes para explicarem o consumo por solo. Observa-se que a quantidade de zonas que se encaixam nesta definição não é elevada e não chegam à 10% de todas as zonas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Percebe-se que ao reduzir o índice de aproveitamento existe um acréscimo na quantidade de zonas problemáticas. Isso se justifica pelo fato de que a oferta destes tipos de solos, como casas ou pequenos espaços comerciais, ocorre por toda a cidade de Fortaleza. Dessa forma, decidir o local exato pode estar mais associado com fatores externos do que com o preço, já que existem desde lugares mais baratos até espaços mais caros. Enquanto edificações que ocupam lotes com elevados índices de aproveitamento tendem a ser mais escassos de tal forma que a variabilidade de opções não é tão grande e o preço dessas edificações costuma ser elevado, o que pode fazer com que tenha um peso bem maior nesta decisão.

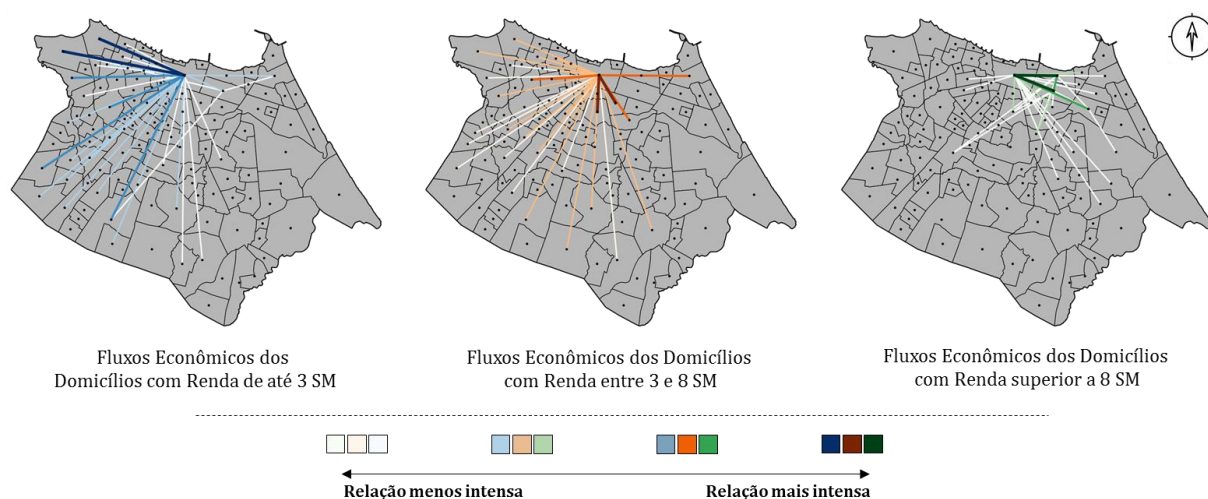
Os preços sombras são indicativos de outros atributos de decisões locacionais, como a busca por morar em lugares mais bonitos da cidade, deixando o preço sombra elevado, ou a aversão a morar em lugares com grande quantidade de favelas. Esses dois exemplos também influenciam diretamente no preço do lugar, mas podem às vezes não conseguir captar toda essa relação entre áreas mais ou menos atrativas para se morar. Na aplicação de Fortaleza, não se

percebe um padrão que permita conclusões para às áreas de análise. Enquanto realizar uma análise individual de cada bairro necessitaria de informações mais completas sobre o uso e a ocupação do solo nessas regiões.

5.3.3 Medida de impacto: fluxos econômicos

Para representarem a distribuição de atividades os fluxos econômicos devem ser agregados de forma a excluir as relações entre os setores e deixando apenas a componente espacial dessas relações, assim como foi exemplificado na Tabela 5. O indicador formado por esta agregação é uma maneira de quantificar o que Lopes (2014) definiu como “distribuição espacial das atividades”. Dessa forma, são geradas matrizes de demanda e produção de cada setor, onde cada célula indicará a quantidade do setor demandado em uma zona “i” e produzido em “j”, sem que se conheça o setor que o demanda. Essas matrizes auxiliam a compreender as decisões locacionais evidenciando as principais zonas de demanda e de produção dos setores. Uma forma de representar este indicador é utilizar linhas de desejo como ocorre na Figura 48, onde são apresentados mapas para os setores populacionais com as 30 maiores relações de produção e consumo de cada setor. Cada linha representa a soma da demanda do setor na zona “i” que é produzido em “j” com a demanda na zona “j” produzida em “i”.

Figura 48 - Fluxos econômicos



Fonte: Elaborado pelo autor.

Percebe-se que as relações mais intensas de demanda pelo setor populacional de baixa renda envolvem as regiões noroeste, sudoeste e central. Conhecendo a distribuição da

população e dos empregos torna-se evidente que existe uma elevada demanda da região central pela população mais carente e que mora na periferia oeste da cidade. Para o segundo grupo socioeconômico as relações mais intensas encontram-se nas bordas da região central, mas também com intensidade elevada ao longo de toda a cidade. Por fim, as atividades desenvolvidas pela população mais rica estão concentradas na região central, tanto do ponto de vista da demanda, como da produção. As relações que fogem a esta regra acabam ocorrendo entre bairros da região central com bairros da região sudeste. Ressalta-se que essa representação não trata de viagens materializadas, mas sim da necessidade de realizar uma atividade espacialmente localizada.

5.4 Modelo de interface

Para calibrar os parâmetros “ pc^{ns} ” e “ cp^{ns} ” foram avaliados os sentidos principais dos deslocamentos na hora de pico da manhã para cada um dos setores econômicos, como pode ser visto na Tabela 8. Por não ter sido realizada uma pesquisa domiciliar em Fortaleza, foi utilizada a pesquisa *screen line* que verificou que 7% dos deslocamentos possuem como motivo o retorno à residência durante a hora de pico. Como não foi possível identificar a atividade de origem dessas viagens, será utilizado o percentual de 7% como a quantidade de viagens que ocorrem no sentido secundário para todas as categorias de transportes. E 93% no sentido principal.

Tabela 8 - Sentido principal das viagens na hora de pico da manhã por setor econômico

Setor Econômico	Sentido Principal das Viagens
Comercial	Produção
Serviços	Produção
Residir Baixa Renda	Consumo
Residir Média Renda	Consumo
Residir Alta Renda	Consumo
Educacional	Produção

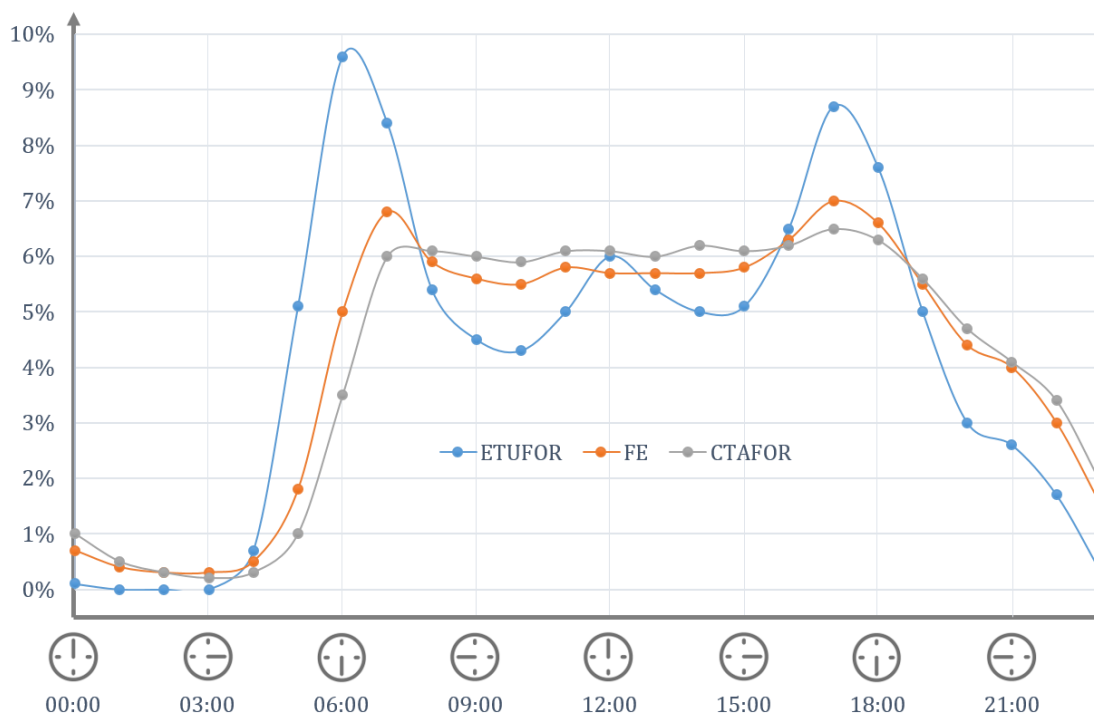
Fonte: Elaborado pelo autor.

Para calibrar o “fator de tempo” foram utilizadas 3 distribuições horárias de quantidades de viagens: 1) distribuição horária média das validações de todos os dias úteis do ano de 2013 nos ônibus da cidade, fornecidas pela ETUFOR; 2) distribuição horária média da quantidade de veículos que trafegaram por vias com fiscalizações eletrônicas (FE) da cidade nos dias úteis de outubro de 2013, fornecidas pelas empresas Trana, Atlanta e Fotosensores, responsáveis pela

coleta desses dados; 3) distribuição horária média da quantidade de veículos que trafegaram pelos laços magnéticos nos dias úteis de outubro de 2013 instalados pelo CTAFOR.

Sobrepondo essas distribuições, como feito na Figura 49, percebe-se que o pico da manhã possui entre 7% e 10% das viagens que ocorrem ao longo do dia. Esse pico ocorre entre 07:00 e 08:00. Assumindo que as distribuições horárias de veículos representam basicamente as viagens por automóvel e motocicletas, pois 92% dos veículos que trafegam pelos pontos de contagens eletrônicas são desses dois tipos, espera-se um percentual médio de aproximadamente 8,5% das viagens ocorrendo neste período, logo 8,5% dos custos com transportes ocorrerão também nesse horário. Sabendo disso, pode-se afirmar que o custo de transportes durante todo o dia é 11,8 ($100/8,5$) vezes maior do que verificado na hora de pico. Esse dia útil típico de carregamento ocorre em média 22 vezes ao longo do mês, portanto, o custo mensal é cerca de 260 vezes maior do que na hora de pico, sendo esse o resultado da calibração do “fator de tempo”; ou seja, as viagens simuladas pelo TRANUS representam apenas 1/260 de todo o custo de transporte que cada indivíduo possui durante o período de 1 mês.

Figura 49 - Distribuições horárias de viagens



Fonte: Elaborado pelo autor.






Fonte dos Dados: ETUFOR (2014), Trana (2014), Atlanta (2014), Fotosensores (2014) e AMC (2014).

5.5 Modelos de transportes

5.5.1 Calibração

Para representar a oferta do sistema de transportes foram considerados os principais modos de deslocamento na cidade: pedestres, ciclistas, carro, moto, ônibus, micro-ônibus, trem e metrô. Na modelagem da demanda, os diferentes padrões de deslocamentos em Fortaleza foram representados por meio da utilização de modelos distintos para cinco grupos de viagens, que são as categorias de transportes da Tabela 9.

Tabela 9 - Categorias de transportes

ID	CATEGORIA
 1	Motivo Trabalho da População de Domicílios com Renda de até 3 SM
 2	Motivo Trabalho da População de Domicílios com Renda entre 3 e 8 SM
 3	Motivo Trabalho da População de Domicílios com Renda acima de 8 SM
 4	Motivo Educação para Toda a População
 5	Outros Motivos para Toda a População

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os parâmetros desses modelos foram calibrados seguindo a proposta metodológica de calibração, a qual propôs uma heurística manual, mas com uma sistematização para a modificação dos parâmetros. Como variáveis que representam os elementos das decisões de transportes foram utilizadas:

1. Quantidade de viagens utilizando o transporte coletivo por ônibus e por micro-ônibus ser aproximadamente similar a 90.700, valor obtido como média das validações de dias úteis do ano de 2014 para o período entre 07:00 e 08:00;
2. Quantidade de integrações ser superior a 7.500, valor obtido como média das validações de dias úteis do ano de 2014 para o período entre 07:00 e 08:00, já que esse número não retrata as integrações ocorridas nos terminais;
3. Quantidade total de automóveis cruzando a cidade em 14 pontos de coleta da *screen line* ser aproximadamente igual a 14.700 no sentido leste e a 11.800 no sentido oeste;

4. Quantidade total de motos cruzando a cidade nos 14 pontos de coleta da *screen line* ser aproximadamente similar a 10.700 no sentido leste e a 4.500 no sentido oeste;
5. Quantidade total de bicicletas cruzando a cidade nos 14 pontos de coleta da *screen line* ser aproximadamente similar a 1.000 no sentido leste e a 500 no sentido oeste;
6. Relação entre as viagens geradas por motivo educação e as viagens por motivo trabalho ser de aproximadamente 18%, pois foi essa a relação obtida a partir das validações de meias passagens e das validações de passagens inteiras;
7. Relação entre as viagens por motivo outros e as viagens por motivo trabalho ser de 10%, relação encontrada a partir da pesquisa de *screen line*.

Essas metas de calibração guiaram o processo de calibração. No princípio, foram definidos mínimos, máximos e elasticidades para a geração de viagens. Ao ser executado o modelo, esses parâmetros foram sendo ajustados até ser encontrado um número de viagens que atendessem as metas 1, 6 e 7. Isso foi realizado no começo de cada iteração. Segunda etapa dessa calibração era a calibração dos parâmetros do custo generalizado que foram modificados para atender às metas 2, 3, 4 e 5.

No princípio, a moto se mostrou como um modo muito atrativo para a cidade de Fortaleza, fazendo com que a meta 4 estivesse sendo ultrapassada para todos os pontos de coleta. Isso foi corrigido aumentando o parâmetro *modal constant*. Esse mesmo tipo de situação ocorreu para o carro, para os ciclistas, para os ônibus e micro-ônibus que passaram também por um ajuste de seus respectivos parâmetros. Após algumas execuções, foram obtidos os resultados das metas apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Indicadores da calibração dos modelos de transportes

Metas	Esperado	Alcançado
1	90.700	96.313
2	> 7.500	10.265
3	14.700 / 11.800	15.969 / 8.320
4	10.700 / 4.500	10.984 / 3.609
5	1.000 / 500	449 / 337
6	18%	17%
7	10%	12%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os parâmetros dos modelos de geração de viagens são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Parâmetros dos modelos de geração de viagens

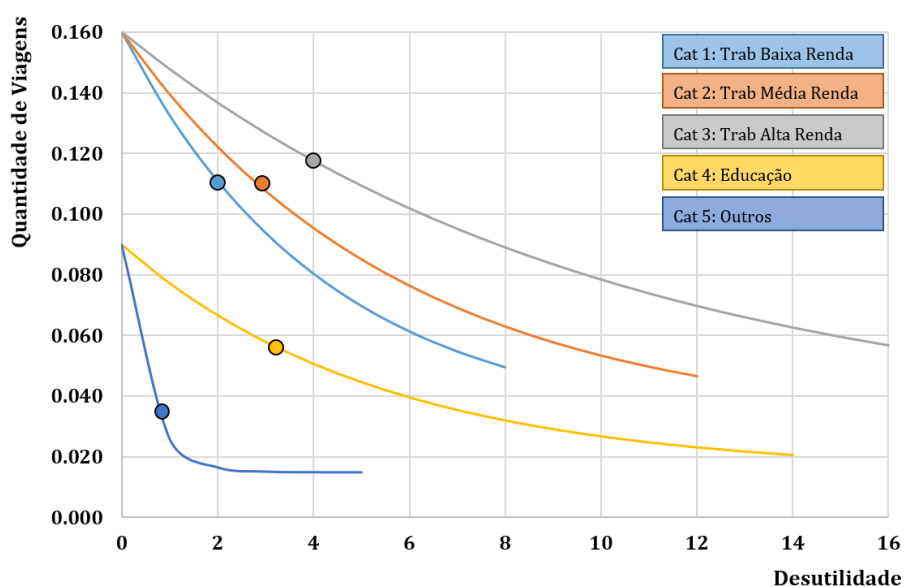
Categoria de Transporte	Unidade de Medida *	Viagens Mínimas	Viagens Máxima	Elasticidade
1	Viagens / Pessoa	0.030	0.160	0.941
2	Viagens / Pessoa	0.030	0.160	0.595
3	Viagens / Pessoa	0.030	0.160	0.383
4	Viagens / Matrícula	0.015	0.100	0.237
5	Viagens / Domicílio	0.015	0.100	0.996

* Viagens na Hora de Pico da Manhã

Fonte: Elaborado pelo autor.

Esses parâmetros permitem descrever graficamente as funções de demanda elástica por viagens (Figura 50), onde os pontos em destaque indicam as desutilidades médias de cada uma das categorias de transportes com o extremo máximo de cada curva correspondendo a 4 vezes a desutilidade média, configurando assim a faixa de aplicação em cada uma das curvas. Percebe-se que as desutilidades enfrentadas pelos deslocamentos motivo trabalho de rendas mais altas são maiores do que as desutilidade enfrentadas por classes de renda mais baixas. Isso ocorre porque os modos utilizados por esses passageiros são mais caros, além de penalizarem mais o tempo de deslocamento.

Figura 50 - Demanda elástica por viagens



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os parâmetros do custo generalizado que foram modificados podem ser observados na Tabela 12.

Tabela 12 - Parâmetros dos modelos de divisão modal / alocação

Operador	Parâmetro	Cat 1	Cat 2	Cat 3	Cat 4	Cat 5
Pedestre	<i>Modal Constant</i>			1		
	<i>Penal Factor</i>	1	1	1	1	1
Integração	<i>Modal Constant</i>			1.7		
	<i>Penal Factor</i>	1	1	1	1	1
Carro	<i>Modal Constant</i>			4.7		
	<i>Penal Factor</i>	1.3	1.2	1.1	1.3	1.2
Moto	<i>Modal Constant</i>			5.9		
	<i>Penal Factor</i>	1.2	1.3	1.4	1.5	1.4
Ciclista	<i>Modal Constant</i>			2.6		
	<i>Penal Factor</i>	1	1	1	1.1	1
Ônibus	<i>Modal Constant</i>			1.5		
	<i>Penal Factor</i>	1	1	1	1	1
Vans	<i>Modal Constant</i>			1.7		
	<i>Penal Factor</i>	1	1	1	1	1
Vans Metropo.	<i>Modal Constant</i>			1		
	<i>Penal Factor</i>	0.9	1	1	1	1
Ônibus Metropo.	<i>Modal Constant</i>			1		
	<i>Penal Factor</i>	1	1	1	1	1
Trem	<i>Modal Constant</i>			1		
	<i>Penal Factor</i>	1	1	1	1	1
Metrô	<i>Modal Constant</i>			1		
	<i>Penal Factor</i>	1	1	1	1	1
VLT	<i>Modal Constant</i>			1		
	<i>Penal Factor</i>	1	1	1	1	1

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nos parâmetros de escolha modal fica evidente a necessidade de se penalizar os modos mais rápidos de transporte, entretanto por motivos distintos. A penalização do carro ocorre porque seu elevado valor de aquisição faz com que uma parte da população não o possua, dessa forma, foi necessário penalizar todas as categorias de viagens. A penalização da moto está mais relacionada com uma questão de segurança viária. Como esse modo é considerado um dos mais inseguros, grande parte da população prefere não utilizá-lo. Por fim, a penalização da bicicleta ocorre porque não é um modo usual de transporte na cidade de Fortaleza.

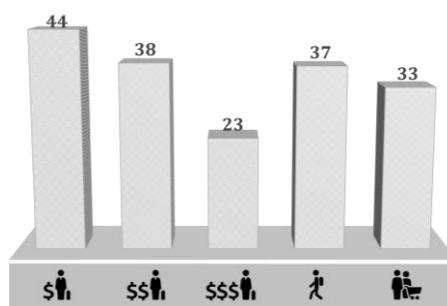
5.5.2 Medida de desempenho: custo generalizado

No Capítulo 2 conclui-se que as medidas de desempenho e de impacto do subsistema de transporte são representadas pela mesma variável, o custo compósito. Optou-se por realizar a análise desse indicador apenas na sessão de medidas de impacto (seção 5.5) e dedicar esta seção à análise do tempo de deslocamento que é um dos componentes do custo compósito e um dos indicadores do desempenho dos transportes mais utilizados. Ressalta-se que outros componentes podem ser analisados, como o tempo de espera, o tempo gasto dentro do veículo e os custos do deslocamento.

Usualmente, o tempo médio de viagem é utilizado no processo de calibração de modelos de transportes como uma medida de desempenho a ser alcançada, o que não foi o caso deste trabalho, pois não existem pesquisas recentes em Fortaleza que subsidiassem a coleta desta informação. Mesmo que o tempo seja incorporado ao processo de calibração, os resultados disponibilizados ao final deste processo possuem a vantagem de permitirem uma desagregação maior do que aqueles que uma coleta de dados possibilita.

A primeira maneira de se analisar este indicador é com sua completa agregação por meio do tempo médio de deslocamento que, para Fortaleza, ficou em aproximadamente 40 minutos para a hora de pico. Essa variável pode ser desagregada nas categorias de transportes, o que permitirá uma comparação entre os diversos motivos, como apresenta a Figura 51. O motivo com maior tempo de deslocamento é o trabalho com aproximadamente 40 minutos de duração, seguido pelo motivo educação e por outros motivos, ambos com tempos médios de deslocamento acima de 30 minutos.

Figura 51 - Tempo médio de deslocamento por categoria de viagem (em minutos)



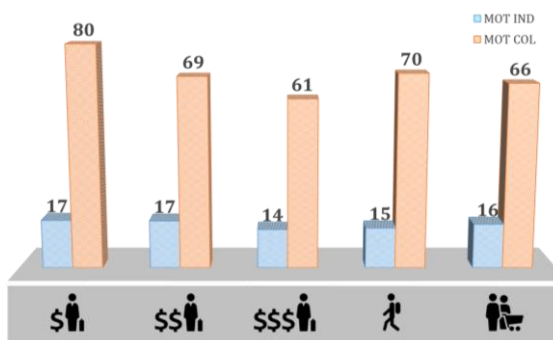
Fonte: Elaborado pelo autor.

Quando as categorias de transporte incorporam aspectos sociais, como foi o caso do motivo trabalho, pode-se avaliar a problemática focando em grupos sociais de risco, que são as

parcelas da população que vão ser mais afetados por um problema, neste caso o problema do elevado tempo de deslocamento. Por exemplo, percebe-se que a população de renda mais baixa da cidade apresenta um tempo médio de deslocamento casa-trabalho que é o dobro da população de renda mais alta.

O tempo médio de deslocamento pode ser também desagregado pelos modos de transporte. No caso do transporte motorizado coletivo esse tempo é em média de 1 hora e 15 minutos, enquanto o motorizado individual teve um resultado bem inferior, de apenas 16 minutos. Pode-se ainda desagregar por categorias de transportes, como na Figura 52, onde percebe-se que o tempo médio do transporte motorizado individual não varia muito independente da categoria, diferentemente do que ocorre para o transporte coletivo que possui diferenças de até 25%. Esse processo de desagregar o tempo de deslocamento pode continuar para incorporar diferenças entre os operadores permitindo assim perceber se existe algum deles que mais contribui para os problemas em torno do tempo de viagem.

Figura 52 - Tempo médio de deslocamento por categoria de viagem e por modo (em minutos)

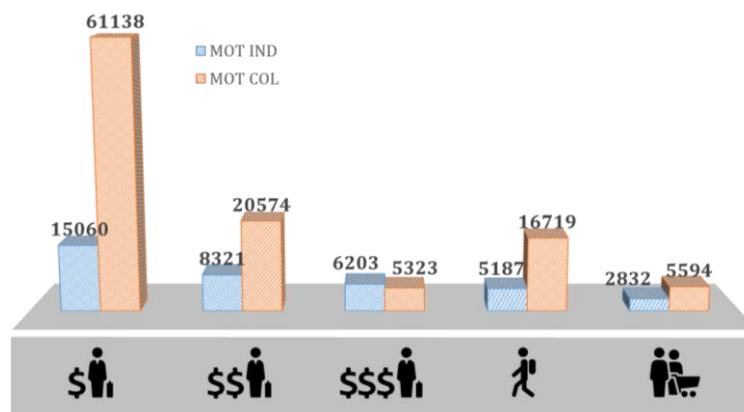


Fonte: Elaborado pelo autor.

Apesar dessas análises serem importantes para se compreender o desempenho e a problemática interna ao subsistema de transportes, reconhece-se que elas podem ser obtidas a partir de inferência estatística e coleta de campo destas variáveis. Entretanto, existem outras variáveis relacionadas com o tempo que necessitariam de uma amostra de tamanho elevado para serem obtidas de maneira confiável. Por exemplo, o tempo total de deslocamento experienciado por essa população. Essa variável é capaz de auxiliar na avaliação de alternativas, mas é também um dos fatores limitantes da realização de atividades, pois quanto maior for o tempo gasto nos deslocamentos, menor será a quantidade de atividades que podem ser desenvolvidas em uma cidade. Para a hora de pico de Fortaleza, estimou-se que são gastos por toda a população aproximadamente 2.600 horas em deslocamentos. Essa é uma variável que

pode ser desagregada por categorias de viagens e por modos, como apresentado na Figura 53, o que permite perceber quem é o grupo de risco desta população. Para Fortaleza, verifica-se que a população de baixa renda que utiliza o transporte público é responsável por 40% do tempo perdido em deslocamento na cidade.

Figura 53 - Tempo total de deslocamento por categoria de viagem e por modo (em minutos)



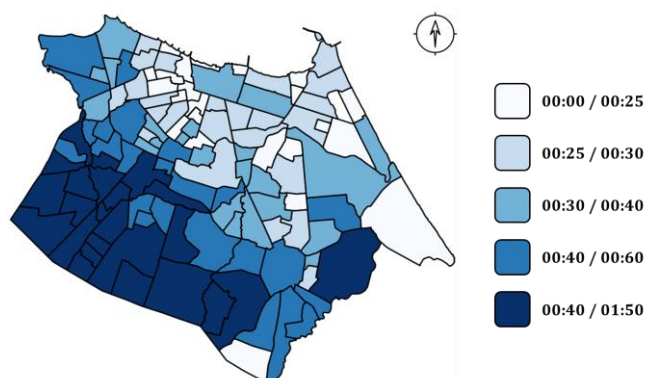
Fonte: Elaborado pelo autor.

Além de quantitativos totais e absolutos, pesquisas amostrais também possuem fragilidade quando se busca realizar uma análise espacial de variáveis, pois o nível de desagregação espacial desejado pode ser uma limitação. Entretanto, da mesma forma que conhecer economicamente quem é o grupo de risco de um problema, reconhecê-lo se utilizando do caráter espacial pode auxiliar gestores e planejadores no direcionamento de políticas públicas. Um exemplo de variável que pode ser utilizada é o tempo médio de deslocamento das viagens que têm origem em cada uma das zonas de análise e que se utilizam dos modos motorizados, como apresentado na Figura 54. Neste caso, percebe-se que a população de risco é a população da região sudoeste e sudeste da cidade, mas que nas regiões nordeste e noroeste da cidade também podem ser encontrados bairros cujo tempo médio de deslocamento é superior à média (40 minutos) da cidade.

Uma relação deficiente entre a demanda e a oferta do subsistema de transporte pode aumentar o tempo de deslocamento da população, ou seja, pode reduzir o nível de serviço desta rede. Esta queda na qualidade do deslocamento pode impactar na demanda por viagens através da redução da quantidade de deslocamentos. Primeiro porque o usuário do sistema pode desistir de viajar como no caso de viagens de motivo “outros”. Segundo porque o usuário precisa realizar o deslocamento mais cedo para que chegue ao destino no horário programado, como é o que caso de viagens motivo trabalho e educação que não podem deixar de acontecer. Essa

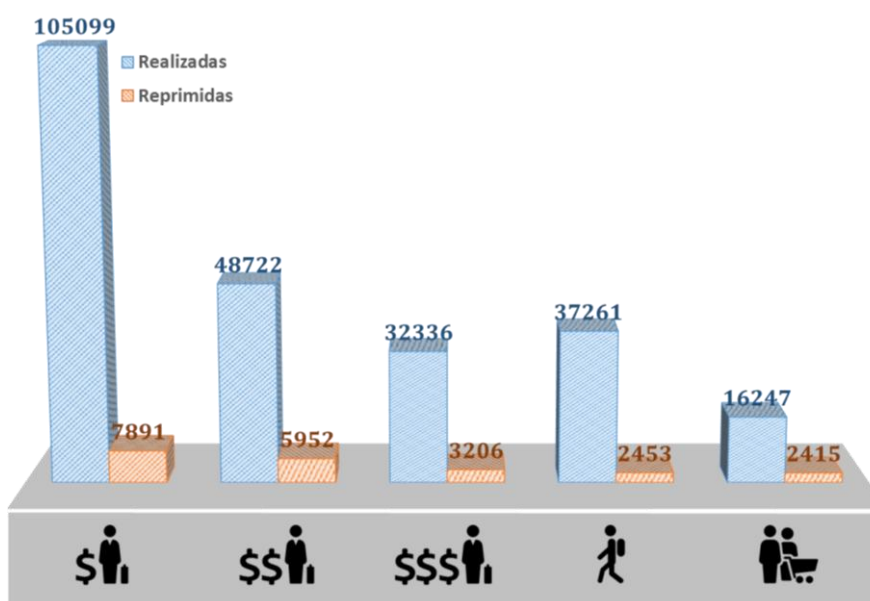
demanda que deixou de ser realizada ou que migrou para outros horários recebe o nome de demanda reprimida, pois existe o desejo de realizar uma atividade, entretanto as condições da malha viária não permitiram que o deslocamento ocorresse no horário desejado. O TRANUS, através do seu modelo de alocação/escolha de modos baseado em equilíbrio da rede, permite obter uma estimativa dessa demanda reprimida. Para Fortaleza esse resultado é apresentado na Figura 55 subdividido em categorias de transporte. São quase 22.000 viagens reprimidas, que correspondem à 10% das viagens realizadas no período, sendo as viagens por motivo “outros” a que mais é impactada com essa rede deficiente, tendo 13% do total de viagens reprimidas.

Figura 54 - Tempo médio de deslocamento das viagens com origem nas zonas e que utilizam modos motorizados



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 55 - Demanda reprimida por categoria de transporte

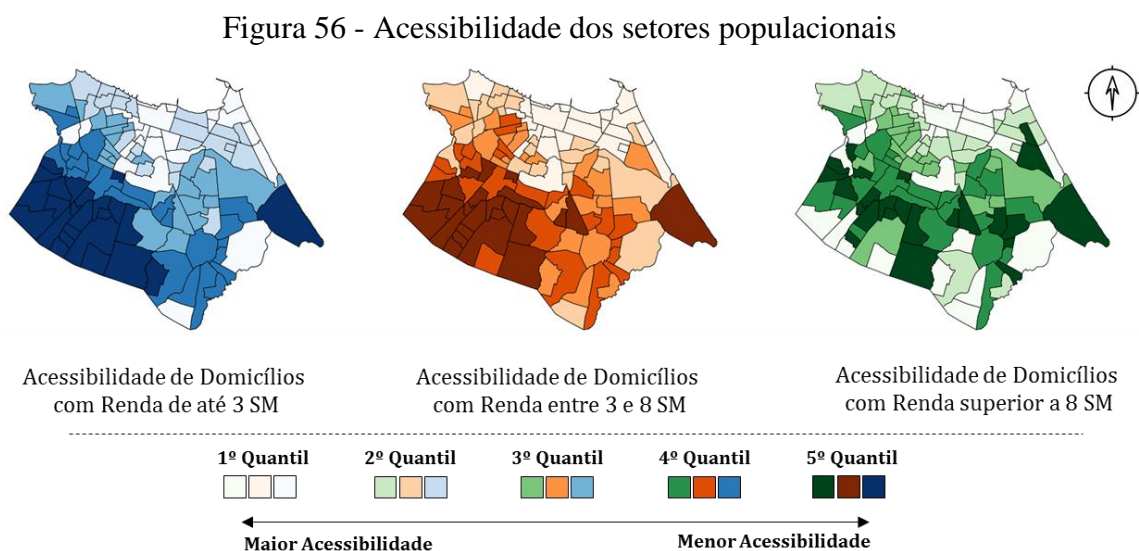


Fonte: Elaborado pelo autor.

5.5.3 Medida de impacto: custo composto

Os problemas relacionados com a acessibilidade são as limitações de acesso da população às atividades que desejam realizar. Essas limitações podem ocorrer de várias maneiras, mas quatro delas se distinguem das demais: a limitação espacial, quando existem diferenças de acessibilidade entre localizações distintas; a limitação por questões socioeconômicas, por exemplo quando grupos de renda distintos experimentam níveis de acessibilidade diferentes; a limitação por modo utilizado, quando as acessibilidades são diferentes para usuários dos modos coletivos e dos modos individuais; e uma limitação de acesso para as gerações futuras por falta de recurso público ou incapacidade operacional de se manter os níveis de acessibilidade ofertados hoje. Esses quatro tipos de limitações podem ser caracterizados com a utilização do TRANUS.

A limitação espacial é percebida por análises individuais dos mapas da Figura 56, que apontam os bairros da região sudoeste da cidade como àqueles com menor nível de acesso. Esses mapas foram criados considerando uma acessibilidade média de todas as viagens que partem de cada zona da análise e utilizando como indicador de acessibilidade a variável “ c_{ij}^S ”.



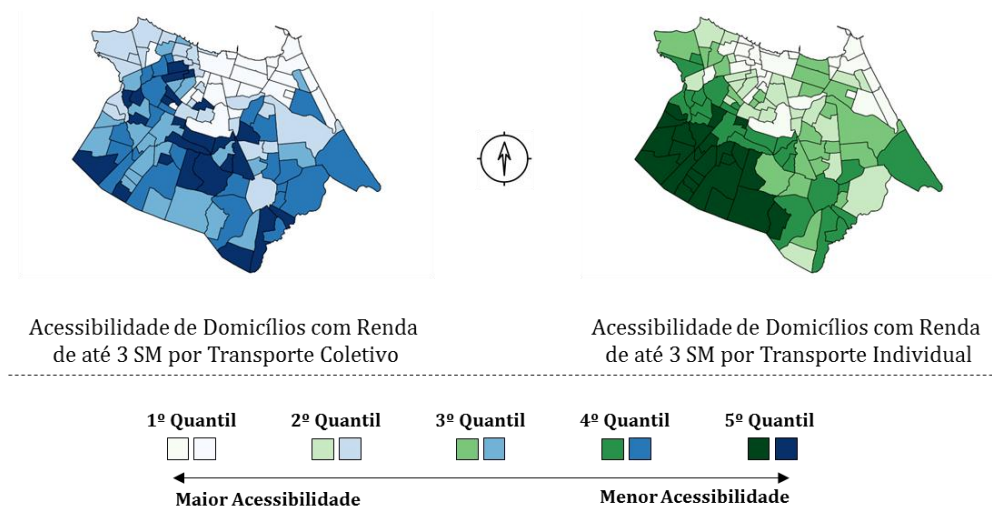
Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 56 também auxilia a perceber as limitações de acesso por questões econômicas, neste caso, a renda da população. Percebe-se que a distribuição dos piores níveis de acesso é bem distinta entre as classes de menor e maior poder aquisitivo. Enquanto os piores níveis da renda mais baixa estão concentrados na região sudoeste, para a renda mais alta esses bairros

estão bem espalhados entre as regiões sudoeste e sudeste. Ao ser analisado também o padrão de distribuição espacial dessas classes (Figura 35), percebe-se que as regiões de menor acessibilidade coincidem com a localização da população de baixa renda, ou seja, esses níveis reduzidos afetam uma grande quantidade de pessoas; entretanto, as áreas de baixa acessibilidade da população de renda mais alta não coincidem com a região central e nordeste, onde se localizam a maior parte dessa população. Verifica-se assim que a população de baixa renda é mais impactada com a baixa acessibilidade do que a população de renda mais elevada, além de ser possível identificar a localização de onde esse problema é mais acentuado.

Para o terceiro tipo de limitação, a análise deve focar em apenas um grupo de renda, mas diferenciá-lo por modos de transportes, por conta disso os mapas da Figura 57 foram criados utilizando a variável “ c_{ij}^{ks} ”, considerando como classe de renda a população de renda mais baixa. Percebe-se que os padrões espaciais dessas acessibilidades são bem distintos. As piores acessibilidades com o transporte coletivo estão distribuídas nas regiões noroeste, sudoeste e sudeste, em bairros geralmente afastados de corredores de transporte público e de terminais de integração da cidade. Já para o transporte individual as piores acessibilidades estão concentradas na região sudoeste, onde há uma elevada quantidade de pessoas e poucas avenidas que permitam a rápida conexão deste modo com a região central.

Figura 57 - Acessibilidade do setor populacional de renda mais baixa por modo de transporte



Fonte: Elaborado pelo autor.

A quarta limitação pode ser avaliada utilizando indicadores do TRANUS, entretanto necessita de dois períodos distintos de tempo, o que não foi realizado nesta aplicação.

5.6 Considerações finais

Ao longo deste capítulo foram apresentadas algumas conclusões sobre os padrões espaciais de localização das pessoas e de empregos na cidade de Fortaleza, assim como do padrão de deslocamento da cidade. A maioria dessas conclusões mostra-se coerente com o fenômeno modelado, apesar das limitações da calibração.

Ao fim do capítulo anterior, ao se tratar da proposta metodológica de calibração, reconheceu-se que era necessário propor e aplicar um método de validação antes de se utilizarem informações dos modelos no processo de compreensão da problemática. Nessas considerações, foram apresentados os três métodos de validação mais comuns, os quais focavam em comparar variáveis modeladas com variáveis coletadas. Essa aplicação de Fortaleza não passou por um procedimento de validação, mas ainda assim foi capaz de apresentar resultados condizentes com o fenômeno urbano da cidade. Neste contexto, imagine-se que a compreensão da problemática, possibilitada pelos modelos LUTI, possa ter um papel a desempenhar dentro dos métodos de validação desses modelos.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 Conclusões

No processo de planejamento urbano, os modelos têm sido utilizados apenas na fase de avaliação de intervenções de solução. Contudo, esses modelos podem desempenhar funções nas fases estratégicas desse planejamento, sendo úteis como plataforma de comunicação entre os atores, como ferramenta de mediação de discussão, mas também com o propósito de auxiliar a caracterizar e diagnosticar a problemática em foco. Para que essas ferramentas sejam utilizadas na compreensão de uma problemática, o processo de calibração deve estar voltado para representar de forma adequada essa problemática.

Atualmente, vários modelos se intitulam LUTI, entretanto cada um deles possui suas peculiaridades ao modelar as decisões e relações dos três subsistemas urbanos: atividades, uso do solo e transportes. Entre sete modelos analisados, percebeu-se que a maior parte não representa satisfatoriamente o subsistema de atividades, ou não o distingue do subsistema de uso do solo. Reconhecer esses três subsistemas, auxiliaria a compreender não apenas as decisões que possuem uma componente espacial (por exemplo, onde comprar pão), mas também aquelas que não possuem (por exemplo, qual tipo de pão comprar).

Verificou-se que os modelos LUTI são, em sua maioria, agregados, determinísticos e razoavelmente dinâmicos. Independente do modelo, sempre ocorre algum nível de agregação, seja no tempo, no espaço, ou no processo decisório. E mesmo os modelos ditos desagregados, ainda são dependentes de algum nível de agregação espacial. Os modelos estocásticos são ainda incipientes e não existe um entendimento sobre o que é dinamicidade, que é utilizada como o oposto de estático ou de equilíbrio. A análise desses quatro aspectos em cada um dos modelos permitiu verificar que eles não foram elaborados tendo como base uma representação conceitual, o que dificulta o processo de compreensão das decisões que estão sendo modeladas.

Mesmo de posse de uma representação conceitual, o modelador ainda precisa investigar como esse modelo simula cada uma das decisões e representa cada um dos indicadores. Foi com este o objetivo que, no terceiro capítulo deste trabalho, foi realizada uma análise dos modelos matemáticos e computacionais do modelo TRANUS. Constatou-se que a análise dos modelos não é mera formalidade na utilização de um modelo LUTI. Compreendê-los, auxiliou na identificação dos parâmetros que servem de indicadores na compreensão da problemática e que serviram para nortear o processo de calibração; possibilitou avaliar as limitações das teorias

utilizadas por esses modelos, dessa forma, será possível encontrar caminhos para reduzi-las ou eliminá-las; e a verificar se o modelo é válido para representar cada uma das decisões ou elementos dos subsistemas urbanos, permitindo que os modeladores busquem ferramentas adicionais para simular decisões não modeladas. Essa investigação foi tratada como o ponto de partida para a calibração da plataforma, pois também contribuiu para identificar as teorias na qual a plataforma é embasada, assim como os parâmetros de calibração do modelo.

Tendo por base os parâmetros classificados como indicadores da problemática, o quarto capítulo apresenta uma discussão sobre as limitações do processo de calibração convencional do TRANUS e propõe algumas melhorias. Tais propostas buscam alterar os métodos de calibração orientados principalmente pela minimização das diferenças entre medidas de desempenho coletadas e modeladas, para uma proposta onde se incorpore os significados fenomenológicos desses parâmetros. Ao ser primeiro analisado o que cada parâmetro representa, foi possível repensar a base de dados utilizada na calibração, assim como propor métodos de calibração que incorporem uma melhor utilização das informações disponíveis.

A aplicação dessa proposta metodológica para a cidade de Fortaleza nos permite demonstrar como esses indicadores são úteis para caracterizar e diagnosticar a problemática de uma região. Como não foi utilizada uma problemática específica, foram exemplificadas análises que podem incorporar os parâmetros calibrados, mas sem o objetivo de esgotar este assunto. Nesta análise, não foram discutidos resultados tradicionais de modelos de transportes, como: quantidade de viagens, matriz origem destino, ou divisão modal. Não que esses indicadores não sejam úteis na compreensão da problemática, mas porque o objetivo era o de apresentar como os parâmetros e variáveis utilizadas pelo TRANUS são também úteis a este processo.

Cada uma dessas etapas possuiu um método similar de análise. Esse método foi estruturado tendo por base a representação conceitual do fenômeno. Dessa forma, cada etapa focou-se nas representações internas de cada um dos três subsistemas e também nas medidas de impacto entre eles. Reconhecer esse fenômeno foi o que permitiu identificar as limitações dos modelos e a propor métodos de calibração e de utilização de bancos de dados mais condizentes com o que se espera dos modelos LUTI. Dessa forma, esse método de análise não está restrito ao modelo TRANUS, pois pode ser também replicado para avaliar a capacidade de outros modelos de simularem o fenômeno urbano.

Com essa proposta, a calibração dos modelos LUTI, muitas vezes demorada e cansativa, pode contribuir para o processo de planejamento antes do modelo estar totalmente calibrado. Como visto, a modelagem comportamental inerente a esses modelos pode e deve ser utilizada para auxiliar na compreensão do fenômeno urbano. Verificou-se que os parâmetros são mais

do que passos intermediários para se encontrar resultados, como os volumes e as velocidades nas redes de transporte, portanto analisá-los também trará contribuições ao processo de planejamento. Sendo assim, reconhecer e discutir a capacidade da calibração dos modelos LUTI em auxiliar nas fases estratégicas do processo de planejamento é a contribuição principal desta dissertação de mestrado.

6.2 Recomendações de trabalhos futuros

A seleção do TRANUS para este trabalho teve como justificativa a sua capacidade de representação do fenômeno urbano como um todo. Apesar disso, o URBANSIM foi também considerado uma plataforma capaz de representar esse fenômeno, apesar de considerar o subsistema de transportes de forma externa. Por conta disso, a aplicação desse método de análise utilizando o URBANSIM pode ser útil para compreender as diferenças de modelagem e de representação do fenômeno entre uma abordagem reconhecidamente desagregada e uma outra considerada econométrica.

Ao serem analisados os modelos matemáticos e computacionais do TRANUS, percebeu-se que o modelo não simula alguns elementos do fenômeno urbano, como as medidas de impacto dos subsistemas de transportes e de uso do solo no subsistema de atividades. Além disso, alguns modelos não utilizam o que há de melhor dentro de cada teoria, por exemplo, os modelos de escolha discreta que se limitam a aplicação de modelos aninhados multinomiais *logit*. Dito isso, recomendamos duas evoluções para o modelo. Primeiro, que sejam desenvolvidos modelos para representar os elementos e decisões do fenômeno que ainda são considerados. Segundo, que se aprimore a modelagem já aplicada para assim reduzir as limitações de aplicação da ferramenta.

Reconhecemos que a proposta metodológica desenvolvida neste trabalho é limitada, mas que atende ao objetivo específico a que se propõe. Contudo, pode-se avançar na proposta metodológica deste processo de calibração, utilizando novas ferramentas, ou adaptando as existentes. Além disso, nos questionamos se a calibração de um modelo LUTI deve mesmo ser única, ou se ela deve ser adaptada a cada novo objetivo de aplicação. Dessa forma, indicadores da problemática seriam mais relevantes a cada trabalho e conseqüentemente os métodos de calibração seriam aprimorados para se atender aos objetivos da aplicação. A segunda proposta é então conceitual: investigar as diferenças de uma única calibração para uma determinada região e período de tempo contra uma calibração específica a cada trabalho.

Na calibração para Fortaleza ocorreram algumas limitações de dados, principalmente para representar as decisões de transporte. A última pesquisa domiciliar de origem destino que ocorreu na cidade foi em 1996 e optamos por não utilizá-la, pois as modificações nos três subsistemas ao longo desses 20 anos foram significativas. Por conta disso, recomenda-se uma calibração para a cidade que se utilize de uma melhor base de dados, ou que se utilize melhor das bases existentes. Dados como as validações do transporte público e de contagens de tráfego veicular através de equipamentos de fiscalização eletrônica podem ser úteis para muito mais do que simplesmente calibrar as funções de escolha de rota. Além disso, propomos também que seja realizada uma aplicação onde a problemática esteja previamente definida, já que aqui tratamos de problemática no conceito mais amplo, sem nos atermos a nenhum problema específico.

REFERÊNCIAS

ACHEAMPONG, R. A.; SILVA, E. Land use – transport interaction modeling : A review of the literature and future research directions. **Journal of Transport and Land use**, v. 8, n. 3, p. 11–38, 2015.

BANISTER, D. The sustainable mobility paradigm. **Transport Policy**, v. 15, n. 2, p. 73–80, 2008.

BARRA, T. DE LA. **Integrated land use and transport modelling: Decision chains and hierarchies**. New York, USA: Cambridge University Press, 1989. v. 1

_____. **TRANUS : Sistema Integrado de Simulação da Localização das Atividades , Usos do Solo e Transportes**. Caracas, Venezuela: [s.n.].

_____. **Formulación matemática de TRANUS**. Caracas, Venezuela: [s.n.].

_____. **Calibration of the Land Use model in TRANUS**. Caracas, Venezuela: [s.n.].

_____. **TRANUS User Guide**. Caracas, Venezuela: [s.n.].

BARRA, T. DE LA; FRANCO, H.; RAMOS, R. El modelo de Chile : insumo-producto y asignación multimodal de carga y pasajeros. **Ingeniería de Transporte**, v. 16, n. 2, p. 23–33, 2012.

BATTY, M. A chronicle of scientific planning - The Anglo-American modelling experience. **Journal of the American Planning Association**, v. 60, n. 1, p. 7–16, 1994.

BERECHMANN, J.; SMALL, K. A. Research policy and review 25. Modeling land use and transportation: an interpretive review for growth areas. **Environment and Planning A**, v. 20, n. 10, p. 1285–1309, 1988.

BERRY, S. T. Estimating Discrete-Choice Models of Product Differentiation. **The RAND Journal of Economics**, v. 25, n. 2, p. 242–262, 1994.

BHAT, C. *et al.* **Urban accessibility index: Literature review Research Report**. Austin, USA: [s.n.].

BONNEL, P. *et al.* **A survey on the calibration and validation of integrated land use and transportation models To cite this version :Symposium "Towards integrated modelling of urban systems"**. **Anais...**Lyon, France: 2014

BRÖMMELSTROET, M. TE *et al.* **Transport Models in Urban Planning Practices: Tensions and Opportunities in a Changing Planning Context**. [s.l.] Routledge, 2013.

BRÖMMELSTROET, M. TE; BERTOLINI, L. The Role of Transport- Related Models in Urban Planning Practice. **Transport Reviews**, v. 31, n. 2, p. 139–143, 2011.

CAMBRIDGE SYSTEMATICS. **Travel Model Validation and Reasonableness Checking**

Manual Second Edition. Cambridge, USA: [s.n.].

CAPELLE, T.; STURM, P.; VIDARD, A. Formulating LUTI calibration as an optimisation problem: Example of tranus shadow price estimation. **Procedia Engineering**, v. 115, p. 12–20, 2015.

CASCETTA, E. **Transportation Systems Analysis.** Second ed. Boston, MA: Springer US, 2009. v. 29

CLARK, W. A. V; ONAKA, J. L. Life Cycle and Housing Adjustment as Explanations of Residential Mobility. p. 47–57, 1983.

COORDENAÇÃO DE APERFEIÇOAMENTO DE PESSOAL DE NÍVEL SUPERIOR. **Dados do Cadastro dos Programas de Pós-Graduação.** Disponível em: <<http://www.capes.gov.br/component/weblinks/weblink/39-link-externo/96-cadastradiscentes>>. Acesso em: 19 mar. 2016.

DOMENCICH, T. A.; MCFADDEN, D. **Urban Travel Demand: A behavioral analysis.** 1st Editio ed. New York, USA: North-Holland Publishing, 1975.

DUTTA, P. *et al.* Calibration of an integrated land-use and transportation model using maximum-likelihood estimation. **IEEE Transactions on Computers**, v. 63, n. 1, p. 167–178, 2014.

FERNANDEZ, M. **Technical description and pseudo-code of Tranus Land-Use module.** Grenoble: [s.n.].

FEUDO, F. LO. How to Build an Alternative to Sprawl and Auto-centric Development Model through a TOD Scenario for the North-Pas-de-Calais Region? Lessons from an Integrated Transportation-land Use Modelling. **Transportation Research Procedia**, v. 4, p. 154–177, 2014.

FORRESTER, J. W. **Urban Dynamics.** Second ed. Williston: Pegasus Communication, Inc., 1999.

FOTHERINGHAM, A. S.; ROGERSON, P. A. **The SAGE Handbook of Spatial Analysis.** [s.l.] SAGE Publishing Ltd, 2009.

GARCIA, C. S. H. F. **Strategic Assessment of Accessibility on Urban Mobility Networks.** [s.l.] Instituto Superior Técnico, 2015.

GEURS, K. T.; ECK, J. R. VAN. **Accessibility measures: review and applications. Evaluation of accessibility impacts of land-use transportation scenarios, and related social and economic impact RIVM Report.** [s.l.: s.n.].

GEURS, K. T.; MONTIS, A. DE; REGGIANI, A. Recent advances and applications in accessibility modelling. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 49, p. 82–85, 2015.

GEURS, K. T.; WEE, B. VAN. Accessibility evaluation of land-use and transport strategies:

Review and research directions. **Journal of Transport Geography**, v. 12, n. 2, p. 127–140, 2004.

GUDMUNDSSON, H. Analysing Models as a Knowledge Technology in Transport Planning. **Transport Reviews**, v. 31, n. 2, p. 145–159, 2011.

HANSEN, W. G. How Accessibility Shapes Land Use. **Journal of the American Institute of Planners**, v. 25, n. 2, p. 73–76, 1959.

HENSHER, D. A.; ROSE, J. M.; GREENE, W. H. **Applied Choice Analysis**. New York, USA: Cambridge University Press, 2005.

HULL, A.; SILVA, C.; BERTOLINI, L. **Accessibility Instruments for Planning Practice**. [s.l: s.n.].

HUNT, J. D.; KRIGER, D. S.; MILLER, E. J. Current operational urban land- use–transport modelling frameworks: A review. **Transport Reviews**, v. 25, n. 3, p. 329–376, 2005.

HURTUBIA, R.; GALLAY, O.; BIERLAIRE, M. **Attributes of Households , Locations and Real-Estate Markets for Land Use Modeling**. Lausanne: [s.n.].

IACONO, M.; LEVINSON, D. M.; EL-GENEIDY, A. M. Models of Transportation and Land Use Change: A Guide to the Territory. **Journal of Planning Literature**, v. 22, n. 4, p. 323–340, 2008.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Dados da Pesquisa de Orçamento Familiar**. Disponível em:

<http://downloads.ibge.gov.br/downloads_estatisticas.htm>. Acesso em: 19 mar. 2016.

_____. **Dados do XII Censo Demográfico**. Disponível em:

<http://downloads.ibge.gov.br/downloads_estatisticas.htm>. Acesso em: 19 mar. 2016.

_____. **Projeção da População**. Disponível em:

<http://downloads.ibge.gov.br/downloads_estatisticas.htm>. Acesso em: 19 mar. 2016.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTUDOS E PESQUISAS EDUCACIONAIS ANÍSIO TEIXEIRA. **Microdados do Censo da Educação Básica**. Disponível em:

<<http://portal.inep.gov.br/microdados>>. Acesso em: 19 mar. 2016a.

_____. **Microdados do Censo da Educação Superior**. Disponível em:

<<http://portal.inep.gov.br/microdados>>. Acesso em: 19 mar. 2016b.

JONG, G. D. E. *et al.* **Using the Logsum as an Evaluation Measure Literature and Case Study**. [s.l: s.n.].

KII, M.; DOI, K. Multiagent land-use and transport model for the policy evaluation of a compact city. **Environment and Planning B: Planning and Design**, v. 32, n. 4, p. 485–504, 2005.

KOHLI, S.; DALY, A. **The use of logsums in welfare estimation: application in PRISM**.

LITMAN, T.; STEELE, R. **Land Use Impacts on Transport How Land Use Factors Affect Travel Behavior**. Victoria, Canada: [s.n.].

LOPES, A. S. **Transportes, Uso do Solo e Atividades - Modelagem conceitual para o planejamento da acessibilidade urbana**. [s.l.] Universidade Federal do Ceará, 2015.

LOWRY, I. S. **A model of metropolis**. [s.l.: s.n.].

MACKETT, R. L. **The Leeds Integrated Land-Use Transport Model (LILT)**. Crowthorne: [s.n.].

MACKIE, P. J.; JARA-DÍAZ, S.; FOWKES, A. S. The value of travel time savings in evaluation. **Transportation Research Part E**, v. 37, p. 91–106, 2001.

MARSHALL, A. **The Principles of Economics**. 8th Editio ed. London, UK: Macmillan and Co., Ltd., 1920. v. 1

MARTÍNEZ, F. J. MUSSA: Land Use Model for Santiago City. **Transportation Research Record**, v. 1552, n. 1, p. 126–134, 1996.

MENDOZA, G. DE R.; CRUZ, O. B.; MÉNDEZ, J. C. **Manual de evaluación económica de proyectos de transporte Banco Interamericano de Desarrollo**. Washington, USA: [s.n.].

MEYER, M. D.; MILLER, E. J. **Urban Transportation Planning: A Decision-Oriented Approach**. SECOND EDI ed. New York, USA: McGraw-Hill, Incorporated, 2001.

MILLER, E. J. Microsimulation. *In*: GOULIAS, K. G. (Ed.). **Transportation Systems Planning: Methods and Applications**. Boca Raton: CRC Press LLC, 2003. p. 330–351.

MILLER, R. E.; BLAIR, P. D. **Input-Output Analysis Foundations and Extensios**. 2nd Editio ed. New York, USA: Cambridge University Press, 2009.

MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. **Dados da Relação Anual de Informações Sociais**. Disponível em: <<http://trabalho.gov.br/informacoes-classificadas>>. Acesso em: 19 mar. 2016.

MODELÍSTICA. **User Manual : Models and report-generating programs of TRANUSManual**. Caracas, Venezuela: [s.n.].

____. **Tutorial : Exemplos de aplicação passo a passo**. Caracas, Venezuela: [s.n.].

____. **A guide to the application of the TRANUS modeling system to the city of Swindon, UK**. Caracas, Venezuela: [s.n.].

____. **TRANUS User Manual : Graphical Interface and Database of TRANUS - TUS**. Caracas, Venezuela: [s.n.].

MOECKEL, R. *et al.* **SIMULATING INTERACTIONS BETWEEN LAND USE, TRANSPORT AND ENVIRONMENT** 11th World Conference on Transport Research. **Anais...** Berkeley: 2007

ORTÚZAR, J. DE D.; WILLUMSEN, L. G. **Modelling Transport**. 4th Editio ed. West Sussex, UK: Wiley, 2011.

PEREIRA, A.; QUINTANA, S. From technocratic to participatory decision support systems: responding to the new governance initiatives. **Journal of Geographic Information and Decision Analysis** 2002, v. 6, n. 2, p. 95–107, 2002.

PEREIRA, L. DOS S. F. **PROPOSTA METODOLÓGICA PARA ESTIMATIVA DE FLUXOS DE CARGA A PARTIR DE DADOS SECUNDÁRIOS**. [s.l.] Universidade Federal de Minas Gerais, 2013.

PFÄFFENBICHLER, P. C. **The strategic , dynamic and integrated urban land use and transport model MARS (Metropolitan Activity Relocation Simulator)**. [s.l.] Technischen Universität Wien, 2003.

PUPIER, N. **Construction and Calibration of a Land-Use and Transport Interaction Model of a Brazilian City**. [s.l.] Kungliga Tekniska Hogskolan, 2013.

PUTMAN, S. H. **DRAM/EMPAL ITLUP Integrated Transportation Land-Use Activity Allocation Models: General Description**. Philadelphia: S. H. Putman Associates, 1991.

RASOULI, S.; TIMMERMANS, H. J. P. Applications of theories and models of choice and decision-making under conditions of uncertainty in travel behavior research. **Travel Behaviour and Society**, v. 1, n. 3, p. 79–90, 2014.

RUEDA-CANTUCHE, J. M. **The Construction of Input–Output Coefficients Matrices in an Axiomatic Context: Some Further Considerations**XIVth International Input-Output Conference. **Anais...2002**

SECRETARIA DE FINANÇAS DE FORTALEZA. **Dados do Cadastro do Imposto sobre a Propriedade Predial e Territorial Urbana de 2015**Fortaleza, BrazilLei de Acesso à Informação, , 2015.

ŠEVČÍKOVÁ, H.; RAFTERY, A. E.; WADDELL, P. A. Assessing uncertainty in urban simulations using Bayesian melding. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 41, n. 6, p. 652–669, 2007.

SIMMONDS, D. C. The design of the DELTA land-use modelling package. **Environment & Planning B: Planning & Design**, v. 26, p. 665–684, 1999.

SMALL, K. A.; VERHOEF, E. T. **The Economics of Urban**. 2nd Editio ed. New York, USA: Routledge, 2007.

SOARES, F. D. P. **Proposta metodológica de compreensão da problemática das relações entre uso do solo e transportes no planejamento urbano integrado**. [s.l.] Universidade Federal do Ceará, 2014.

SOUTHWORTH, F. **A Technical Review of Urban Land Use -- Transportation Models as Tools for Evaluating Vehicle Travel Reduction Strategies**Search. [s.l: s.n.].

SWANSON, J.; GLEAVE, S. **Transport and the Urban Economy: The Urban Dynamic Model** (M. Schrenk et al., Eds.) Real Corp 008. **Anais...**2008

TIMMERMANS, H. J. P. **The saga of integrated land use-transport modeling: how many more dreams before we wake up?** 10th International Conference on Travel Behaviour Research. **Anais...**Lucerne: 2003

TIMMERMANS, H. J. P.; ARENTZE, T. A. Transport Models and Urban Planning Practice: Experiences with Albatross. **Transport Reviews**, v. 31, n. 2, p. 199–207, 2011.

TRAIN, K. **Discrete Choice Methods with Simulation**. New York, USA: Cambridge University Press, 2009.

TRANSPORTATION DEVELOPMENT BRANCH. **Development and Calibration of the Statewide Land Use-Transport Model** Oregon, USA, 1999.

WADDELL, P. A. UrbanSim: Modeling Urban Development for Land Use, Transportation, and Environmental Planning. **Journal of the American Planning Association**, v. 68, n. 3, p. 297–314, 30 set. 2002.

_____. Integrated Land Use and Transportation Planning and Modelling: Addressing Challenges in Research and Practice. **Transport Reviews**, v. 31, n. 2, p. 209–229, 2011.

WEGENER, M. Operational Urban Models State of the Art. **Journal of the American Planning Association**, v. 60, n. 1, p. 17–29, 1994.

_____. **Current and Future Land Use Models** Land Use Model Conference. **Anais...**Dallas: 1995

_____. Overview of Land Use Transport Models. *In*: HENSHER, D. A. *et al.* (Eds.). . **Handbook of Transport Geography and Spatial Systems (Handbooks in Transport)**. Kidlington, UK: Pergamon / Elsevier Science, 2004. v. 5p. 127–146.

_____. **The IRPUD Model**. Dortmund: [s.n.].

_____. From Macro to Micro – How Much Micro is too Much ? **Transport Reviews**, v. 31, n. October 2009, p. 161–177, 2011b.

WEGENER, M.; GNAD, F.; VANNAHME, M. The time scale of urban change. *In*: HUTCHINSON, B.; BATTY, M. (Eds.). . **Advances in Urban Systems Modelling**. Amsterdam: [s.n.]. p. 175–197.

WERNECK, L. F. **CONTRIBUIÇÃO DE UM MODELO LUTI PARA O PLANEJAMENTO INTEGRADO EM TRANSPORTES E USO DO SOLO NA REGIÃO METROPOLITANA DE BELO HORIZONTE**. [s.l.] Universidade Federal de Minas Gerais, 2015.

WILLIAMS, H. C. W. L. On the formation of travel demand models and economic evaluation measures of user benefit. **Environment and Planning A**, v. 9, n. 3, p. 285–344, 1977.