

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
PROGRAMA DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES

**ESTIMAÇÃO SINTÉTICA DE MATRIZES ORIGEM/DESTINO
A PARTIR DE CONTAGENS VOLUMÉTRICAS EM ÁREAS
COM CONTROLE DO TRÁFEGO EM TEMPO REAL COM O
AUXÍLIO DO QUEENSOD**

Dante Diego de Moraes Rosado e Souza

Dissertação submetida ao Programa de
Mestrado em Engenharia de
Transportes da Universidade Federal do
Ceará, como parte dos requisitos para a
obtenção do título de Mestre em
Ciências (M.Sc.) em Engenharia de
Transportes

ORIENTADOR: Prof. Dr. Carlos Felipe Grangeiro Loureiro

**Fortaleza
2007**

FIICHA CATALOGRÁFICA

SOUZA, DANTE DIEGO DE MORAES ROSADO E

Estimação Sintética de Matrizes Origem/Destino a partir de Contagens Volumétricas em Áreas com Controle do Tráfego em Tempo Real com o Auxílio do Queensod. Fortaleza, 2007.

XV, 120 fl., Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2007.

1. Transportes - Dissertação 2. Estimação de Matrizes OD
3. Controle Centralizado do Tráfego Urbano – Sistemas CTA 4. QueensOD

CDD 388

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SOUZA, D. D. DE M. R. E (2007). Estimação Sintética de Matrizes Origem/Destino a partir de Contagens Volumétricas em Áreas com Controle do Tráfego em Tempo Real com o Auxílio do Queensod. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 120 fl.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Dante Diego de Moraes Rosado e Souza

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Estimação Sintética de Matrizes Origem/Destino a partir de Contagens Volumétricas em Áreas com Controle do Tráfego em Tempo Real com o Auxílio do Queensod.

Mestre / 2007

É concedida à Universidade Federal do Ceará permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Dante Diego de Moraes Rosado e Souza

Rua Gontran Gifoni, 1100, Luciano Cavalcante

608100-220 – Fortaleza/CE – Brasil

ESTIMAÇÃO SINTÉTICA DE MATRIZES ORIGEM/DESTINO A PARTIR DE
CONTAGENS VOLUMÉTRICAS EM ÁREAS COM CONTROLE DO TRÁFEGO EM
TEMPO REAL COM O AUXÍLIO DO QUEENSOD

Dante Diego de Moraes Rosado e Souza

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE
MESTRADO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES DA UNIVERSIDADE FEDERAL
DO CEARÁ COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO
GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES.

Aprovada por:

Prof. Carlos Felipe Grangeiro Loureiro, Ph.D.
(Orientador)

Prof^a. Nadja Glheuca da Silva Dutra, D.Sc.
(Examinador Interno)

Prof. Waldemiro de Aquino Pereira Neto, D.Sc.
(Examinador Interno)

Prof. Eiji Kawamoto, D.Sc.
(Examinador Externo)

FORTALEZA, CE – BRASIL

JULHO DE 2007

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Dalton e Albeniza, pelo amor dispensado e por terem sempre acreditado em mim, amo vocês incondicionalmente.

AGRADECIMENTOS

A conclusão dessa dissertação não seria possível sem a ajuda de vários colaboradores.

Queria agradecer, primeiramente, ao professor Felipe Loureiro por todo incentivo, amizade e apoio dado desde a época da graduação no curso de Engenharia Civil. Foi sem dúvida o melhor professor que eu já tive.

Agradeço aos colegas de trabalho da AMC, por estarmos juntos nesta árdua tarefa de tornar o trânsito de nossa cidade mais consciente e humano. Cabe aqui um destaque especial para todos os que colaboraram na etapa de coleta dados.

Por fim, agradeço também a minha família e amigos por acreditarem no meu potencial e por terem incentivado a realização deste sonho.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
INTRODUÇÃO	1
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2 PROBLEMA DE PESQUISA	2
1.3 OBJETIVOS DA PESQUISA	4
1.3.1 Objetivo Geral.....	4
1.3.2 Objetivos Específicos.....	5
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	5
CAPÍTULO 2	7
MÉTODOS DE ESTIMAÇÃO DE MATRIZES ORIGEM/DESTINO	7
2.1 MÉTODOS TRADICIONAIS DE OBTENÇÃO DE MATRIZES OD	7
2.1.1 Pesquisa Domiciliar.....	7
2.1.2 Pesquisa com Entrevista no Emprego.....	10
2.1.3 Pesquisa de Diário de Viagens.....	10
2.1.4 Pesquisa de Placas.....	11
2.1.5 Outras Pesquisas Importantes.....	13
2.2 MÉTODOS SINTÉTICOS DE ESTIMAÇÃO DE MATRIZ OD A PARTIR DE CONTAGENS VOLUMÉTRICAS	14
2.2.1 Dificuldades Associados aos Métodos Sintéticos de Estimação.....	15
2.2.2 Formulações Propostas.....	20
2.2.3 Implementações Computacionais.....	32
CAPÍTULO 3	42
CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DO ESTUDO DE CASO	42
3.1 CONTROLE DE TRÁFEGO EM ÁREA DE FORTALEZA (CTAFOR)	42
3.2 DELIMITAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO DO CASO	46
3.3 CARACTERIZAÇÃO QUANTO AO USO DO SOLO	47
3.4 CARACTERIZAÇÃO QUANTO AOS ASPECTOS FUNCIONAIS E FÍSICOS DAS VIAS	49
3.5 CARACTERIZAÇÃO QUANTO AOS ASPECTOS OPERACIONAIS DAS VIAS	50

3.6	CARACTERIZAÇÃO DOS DESLOCAMENTOS NA ÁREA DO ESTUDO DE CASO.....	51
3.6.1	Zoneamento da Área de Estudo	52
3.6.2	Pesquisa de Leitura de Placa.....	53
	CAPÍTULO 4.....	63
	ANÁLISE DAS MATRIZES ESTIMADAS PARA A ÁREA DE ESTUDO DO CASO.....	63
4.1	COLETA E CODIFICAÇÃO DOS DADOS.....	63
4.1.1	Geometria da Rede	64
4.1.2	Controle do Tráfego	65
4.1.3	Fluxo de Tráfego Observado.....	66
4.2	CALIBRAÇÃO DO MODELO DE ESTIMAÇÃO DO QUEENSOD	71
4.2.1	Calibração do Critério de Erro para as Diferenças entre os Fluxos Estimados e Observados.....	72
4.2.2	Calibração do Critério de Erro para as Diferenças entre as Demandas Estimadas e Observadas	76
4.3	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS RESULTADOS QUANTO À QUALIDADE DA MATRIZ OD SEMENTE	80
4.4	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS RESULTADOS QUANTO À QUANTIDADE DE INFORMAÇÕES DE FLUXOS DE TRÁFEGO UTILIZADAS.....	81
4.5	ANÁLISE DA VARIABILIDADE DA DEMANDA.....	87
4.5.1	Variabilidade da Demanda ao Longo do Dia.....	88
4.5.2	Variabilidade da Demanda ao Longo dos Dias.....	92
	CAPÍTULO 5.....	94
	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	94
5.1	CONCLUSÕES.....	94
5.2	RECOMENDAÇÕES.....	98
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100
	ANEXOS.....	105
	ANEXO I	106

MATRIZ OD AMOSTRAL E EXPANDIDA DO PERÍODO DE ANÁLISE (17H15 - 18H15)	106
ANEXO II	108
ARQUIVOS DE ENTRADA DO QUEENSDO	108

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1:	Idéia central da pesquisa.....	4
Figura 2.1:	Esquema da pesquisa amostral de placa para estimar a matriz OD, adaptada de HELLINGA (1994)	12
Figura 2.2:	Rede hipotética para descrever a possibilidade de múltiplas soluções, adaptada de Rakha <i>et al.</i> (1998a).....	16
Figura 2.3:	Rede hipotética para descrever a possibilidade de múltiplas soluções	17
Figura 2.4:	Rede hipotética para descrever a possibilidade de múltiplas soluções	17
Figura 2.5	Exemplo de inconsistência de fluxos, adaptada de Ortúzar e Willumsen (1994)	19
Figura 2.6:	Representação da demanda de viagens em três estados: macro-estado (a), meso-estado (b) e micro-estado (c) e (d). Adaptada de BERTONCINI (2007).....	22
Figura 2.7:	Variação da entropia do sistema em função da demanda T_{AC}	23
Figura 2.8:	Resultado de estimação para o primeiro cenário	27
Figura 2.9:	Resultado de estimação para o segundo cenário	28
Figura 2.10:	Resultado de estimação para o terceiro cenário	28
Figura 2.11:	Resultado de estimação para o quarto cenário.....	28
Figura 2.12:	Rede hipotética utilizada para descrever o processo de estimação do TransCAD, adaptada de NIELSEN (1998).....	35
Figura 2.13:	Estimação dos fluxos de tráfego e matriz OD após a primeira iteração	35
Figura 2.14:	Estimação de fluxos de tráfego e matriz OD após segunda e terceira iteração.....	36
Figura 2.15:	Estimação dos fluxos de tráfego e matriz OD após a décima iteração	37
Figura 2.16:	Estrutura de arquivos compartilhada entre o QueensOD e o Integration, adaptada de DEMARCHI <i>et al.</i> (2004)	38
Figura 2.17:	Fluxograma de estimação da matriz OD pelo QueensOD, Fonte: M. VAN AERDE & ASSOC. (2002a)	40
Figura 3.1:	Esquema de funcionamento do sistema SCOOT.....	43
Figura 3.2:	Tipos de controle das interseções semaforizadas do município de Fortaleza.....	44
Figura 3.3:	Malha de detectores	45
Figura 3.4:	Evolução da frota de veículos e da taxa de motorização de Fortaleza. Fonte: Detran (2007)	46

Figura 3.5:	Região com controle em tempo real, destacando a área do estudo de caso	47
Figura 3.6:	Área do estudo de caso.....	48
Figura 3.7:	Uso do solo da área do estudo de caso	48
Figura 3.8:	Dados de fluxo de tráfego da área do estudo de caso para o pico da tarde	51
Figura 3.9:	Dados de grau de saturação da área do estudo de caso para o pico da tarde	52
Figura 3.10:	Zoneamento da área do estudo de caso.....	53
Figura 3.11:	Distribuição dos pesquisadores nos postos de observação.....	54
Figura 3.12:	Movimento de conversão do posto de observação 01	55
Figura 3.13:	Tratamento do registro incompleto.....	56
Figura 3.14:	Tratamento do registro errado.....	57
Figura 3.15:	Composição dos caminhos das placas registradas	57
Figura 3.16:	Variação da demanda horária amostral por intervalo de pesquisa	58
Figura 3.17:	Demandas de origem e destino amostrais do período de análise (17h15 - 18h15)	59
Figura 3.18:	Ilustração do processo de expansão da matriz amostral	60
Figura 3.19:	Demanda de origem e destino da matriz OD expandida.....	62
Figura 4.1:	Identificação dos nós e arcos da rede.....	64
Figura 4.2:	Tipos de controle da área de estudo	66
Figura 4.3:	Arcos da rede simulada que possuem laço de detecção	67
Figura 4.4:	Exemplo de diagrama de caixa, fonte OLIVEIRA (2004)	68
Figura 4.5:	Diagramas de caixa da variável fluxo de tráfego do laço de detecção 054:a.....	69
Figura 4.6:	Substituição de valores atípicos por valores médios.....	70
Figura 4.7:	Diagrama de dispersão e reta de regressão das demandas para o segundo cenário utilizando o critério de erro relativo para as demandas e o erro quadrático para os fluxos	73
Figura 4.8:	Diagrama de dispersão e reta de regressão das demandas para o segundo cenário utilizando o critério de erro relativo para as demandas e o erro poissoniano para os fluxos.....	73
Figura 4.9:	Diagrama de dispersão e reta de regressão das demandas estimadas para o segundo cenário.....	74

Figura 4.10:	Diagrama de dispersão entre os fluxos para o segundo cenário utilizando o critério de erro relativo para as demandas e o erro quadrático para os fluxos	74
Figura 4.11:	Diagrama de dispersão entre os fluxos para o segundo cenário utilizando o critério de erro relativo para as demandas e o erro poissoniano para os fluxos	75
Figura 4.12:	Diagrama de dispersão entre os fluxos para o segundo cenário utilizando o critério de erro relativo para as demandas e o erro relativo para os fluxos	75
Figura 4.13:	Diagramas de dispersão e reta de regressão das demandas, fornecendo a matriz OD semente binária, e utilizando os três critérios de erro para as demandas e o erro quadrático para os fluxos.....	76
Figura 4.14:	Diagramas de dispersão e reta de regressão das demandas, fornecendo a matriz OD semente amostral, e utilizando os três critérios de erro para as demandas e o erro quadrático para os fluxos.....	77
Figura 4.15:	Diagramas de dispersão e reta de regressão das demandas, fornecendo a matriz OD semente expandida, e utilizando os três critérios de erro para as demandas e o erro quadrático para os fluxos	78
Figura 4.16:	Rotas sem informação de fluxo de tráfego.....	83
Figura 4.17:	Segundo cenário de informações de fluxo de tráfego	83
Figura 4.18:	Terceiro cenário de informações de fluxo de tráfego	84
Figura 4.19:	Diagrama de dispersão e reta de regressão das demandas estimadas para o primeiro (a) e o segundo (b) cenários de informação de fluxos de tráfego	85
Figura 4.20:	Diagrama de dispersão e retas de regressão das demandas originadas na zona 40 para o primeiro (a) e o segundo (b) cenários de informações de fluxos de tráfego	85
Figura 4.21:	Diagrama de dispersão e reta de regressão das demandas estimadas para o primeiro (a) e o terceiro (b) cenários de informação de fluxos de tráfego	86
Figur 4.22:	Diagrama de dispersão e retas de regressão das demandas originadas na zona 24 para o primeiro (a) e o terceiro (b) cenários de informações de fluxos de tráfego	87
Figura 4.23:	Dados de fluxo de tráfego da área do estudo de caso para o entre-pico da manhã.....	89

Figura 4.24:	Diagrama de dispersão e reta de regressão das demandas estimadas para o pico da tarde e entre-pico da manhã.....	89
Figura 4.25:	Diagrama de dispersão e regressão das proporções das demandas estimadas e do total de viagens para o entre-pico da manhã e pico da tarde	90
Figura 4.26:	Histograma das proporções das demandas estimadas do total de viagens para o entre-pico da manhã	91
Figura 4.27:	Histograma das proporções das demandas estimadas do total de viagens para o pico da tarde	91
Figura 4.28:	Variação da demanda total estimada	93
Figura 4.29:	Variação da demanda para alguns pares OD	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1:	Tamanhos de amostras recomendado e mínimo em pesquisas domiciliares em função da população.....	9
Tabela 2.2:	Observações sobre a pesquisa domiciliar	10
Tabela 2.3:	Representação da Matriz OD em função da demanda entre A e C para a rede hipotética	16
Tabela 2.4:	Matriz OD de maior entropia.....	24
Tabela 2.5:	Cálculo das demandas para a rede hipotética na primeira iteração.....	35
Tabela 2.6:	Cálculo das demandas para a rede hipotética na segunda iteração	36
Tabela 2.7:	Cálculo das demandas para a rede hipotética na terceira iteração.....	36
Tabela 3.1:	Classificações das vias da área do estudo de caso	49
Tabela 3.2:	Classificação das viagens por tipo de deslocamento matriz amostral	59
Tabela 3.3:	Classificação das viagens por tipo de deslocamento matriz expandida	61
Tabela 4.1:	Cenários de estimação para calibração do QueensOD.....	72
Tabela 4.2:	Resultados dos testes de regressão para calibração do Critério de erro a ser utilizado.....	78

Resumo da Dissertação submetida ao PETRAN/UFC como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências (M.Sc.) em Engenharia de Transportes.

ESTIMAÇÃO SINTÉTICA DE MATRIZES ORIGEM/DESTINO A PARTIR DE
CONTAGENS VOLUMÉTRICAS EM ÁREAS COM CONTROLE DO TRÁFEGO EM
TEMPO REAL COM O AUXÍLIO DO QUEENSOD

Dante Diego de Moraes Rosado e Souza

Julho/2007

Orientador: Carlos Felipe Grangeiro Loureiro

Desde 2000, Fortaleza dispõe de um moderno sistema de controle de tráfego em área (CTAFOR) que, apesar de eficaz no controle operacional do tráfego urbano, não soluciona definitivamente os problemas de congestionamento da rede. Uma forma de melhorar o desempenho desse sistema seria obter informações precisas sobre o comportamento de deslocamento do tráfego em sua área de controle, permitindo intervenções em tempo real e caracterizando o CTAFOR como um verdadeiro Sistema Inteligente de Transporte (ITS). Diante deste contexto, o objetivo geral desta pesquisa foi estimar demandas de deslocamento do transporte individual motorizado na região controlada em tempo real pelo CTAFOR, utilizando o modelo de estimação sintética de matriz OD que se baseia em contagens volumétricas do tráfego, implementado no QueensOD. Inicialmente, foi definida uma área de estudo de caso, representativa de toda a região controlada pelo CTAFOR, na qual esse modelo foi aplicado com a finalidade de obter uma maior compreensão e experiência na sua utilização. Após a definição da área de estudo, foi realizada a etapa de calibração do modelo de estimação quanto aos critérios de erro utilizados para calcular as diferenças entre as demandas estimadas e observadas e os fluxos de tráfego estimados e observados. Essa etapa foi seguida de uma análise de sensibilidade dos resultados de estimação frente à variação da qualidade dos dados de entrada (matriz OD semente e fluxos de tráfego) e uma análise da variabilidade da demanda. Como principais conclusões, têm-se que as informações fornecidas pelo controle de tráfego em tempo real realizado pelo CTAFOR sozinhas não são suficientes e dependem do fornecimento de uma matriz OD semente com qualidade para a obtenção de resultados satisfatórios de estimação, e que, caso se deseje estimar matrizes para diferentes períodos do dia, deve-se obter matrizes OD amostrais diretamente em campo para o respectivo horário, visto que a utilização de uma matriz OD semente pré-definida a estrutura da matriz OD a ser estimada.

Abstract of Thesis submitted to PETRAN/UFC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.) in Transportation Engineering.

SYNTHETIC ESTIMATION OF ORIGIN/DESTINATION MATRICES BASED ON
TRAFFIC COUNTS IN AREAS WITH REAL-TIME TRAFFIC CONTROL USING
QUEENSOD

Dante Diego de Moraes Rosado e Souza

July/2007

Advisor: Carlos Felipe Grangeiro Loureiro

Since 2000, Fortaleza has a modern urban traffic control system (CTAFOR) that, although efficiently reaching its operational objectives in controlling the urban traffic, does not solve all the congestion problems on the network. One way of improving the performance of such a system would be to gather precise information about the travel behavior within the area under control, allowing real time actions and characterizing CTAFOR as a real Intelligent Transportation System (ITS). In such a context, the main objective of this research was to estimate motorized person trips patterns in an area within a region under control of Fortaleza's UTC system, using a synthetic OD matrix estimation model which is based in traffic flow volumes, running on QueensOD software. As a first step, it was defined the area for the case study, that would be representative of the whole region controlled by CTAFOR, in which this model was applied with the objective of gaining a better understanding and experience in its use. After defining the study area, it was developed the step of calibrating the estimation model regarding the error criteria used to calculate the differences between estimated and observed trip demands, as well as estimated and observed traffic flows. This step was followed by a sensitivity analysis on the estimation results due to the variation in the quality of the input data (OD seed matrix and traffic volumes) and an analysis of the variability of the demand. As the main conclusions, it can be pointed out that the information provided by CTAFOR alone are not enough to estimate good quality OD matrices, requiring good OD seed matrices. Therefore, if one wants to estimate matrices for different periods of the day, it is necessary to collect sample OD matrices directly in the field for each time period, since the use of a seed OD matrix predefines the structure of the OD matrix to be estimated.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O planejamento urbano é de fundamental importância para o desenvolvimento de uma cidade. A deficiência na sua elaboração e implantação vem sendo uma das principais causas do crescimento desordenado e desequilibrado dos grandes centros urbanos brasileiros, refletindo, hoje, na redução da qualidade de vida de seus cidadãos. A realização adequada desses planejamentos requer um entendimento do comportamento complexo das relações de uso do solo de uma cidade e, especialmente no caso do planejamento de transportes, da integração dessas relações com o sistema de transportes.

Nas últimas décadas, as técnicas de modelagem da demanda por transportes vêm sendo uma das principais ferramentas de auxílio ao planejamento de transportes. A utilização dessa modelagem visa principalmente entender o comportamento dos deslocamentos dos diversos grupos de indivíduos ou mercadorias de uma determinada região e o impacto desses deslocamentos no sistema viário, permitindo, deste modo, determinar a relação entre a demanda e a oferta de transportes. Percebe-se que para a realização de uma modelagem da demanda eficiente, que represente bem essa relação, é primordial a obtenção de informações acuradas sobre os desejos de deslocamento. Em geral, os desejos de deslocamentos de pessoas ou de mercadorias, em uma região, são representados por matrizes de origem-destino (matrizes OD), bidimensionais, onde cada elemento da matriz (células) representa o desejo de deslocamento, ou demanda de deslocamento, entre uma origem e um destino específico.

Uma matriz OD pode ser estimada por diversas formas. Convencionalmente, são utilizados métodos tradicionais que consistem na realização de entrevistas em domicílio, no emprego e ao longo da rede viária. Apesar de eficazes, esses métodos apresentam uma série de problemas. Segundo ORTÚZAR e WILLUMSEN (1994), tais métodos requerem uma quantidade considerável de tempo, recursos humanos e financeiros para sua realização, além de terem seus resultados rapidamente

desatualizados, principalmente em países em desenvolvimento, devido às constantes transformações urbanas.

Diante deste contexto, diversos estudos vêm sendo desenvolvidos com o intuito de obter métodos menos onerosos e demorados na estimação de matrizes OD. Dentre as linhas de pesquisas desenvolvidas, LÓPEZ-REYES e KAWAMOTO (2001) citam a que consiste na busca de técnicas eficientes de coleta e utilização de dados, sendo a técnica de preferência declarada um dos exemplos mais visíveis de esforço, e a que associa dados de fácil obtenção a baixo custo com modelos mais sofisticados do que os tradicionais. Dentro desta segunda linha de pesquisa, podem-se destacar os métodos de estimação de matriz OD baseados em contagens volumétricas do fluxo do tráfego observadas ao longo da rede viária, que vêm sendo desenvolvidos ao longo das últimas quatro décadas e é objeto de estudo dessa pesquisa.

1.2 PROBLEMA DE PESQUISA

Desde 2000, Fortaleza dispõe de um moderno sistema de controle de tráfego em área (CTAFOR) que, apesar de eficaz no controle operacional do tráfego urbano, não soluciona os problemas de congestionamento definitivamente, pois seus objetivos estão relacionados, principalmente, com as conseqüências, focando suas principais atividades no aumento da capacidade do sistema viário, e não com as causas desses problemas. Prova disto é que, apesar de o sistema implementado através do CTAFOR ter alcançado o objetivo principal, aumentando os níveis de serviço operacionais do tráfego urbano, observam-se recentemente alguns sintomas de redução desses níveis em alguns períodos do dia. Como exemplo, pode-se citar que as velocidades médias de deslocamento em períodos de pico nas principais vias arteriais da cidade, segundo LOUREIRO *et al.* (2004), estão variando em torno de 20 km/h, com tendência de queda significativa nos próximos anos em função do crescimento constante da frota de veículos.

Acredita-se que uma forma de melhorar o controle operacional do tráfego urbano, na região monitorada por esse sistema, seria obter um entendimento mais apurado do comportamento do tráfego, conhecendo-se as características de distribuição espacial e temporal dos deslocamentos nessa região. Segundo PARAMAHAMSAN (1999), o controle operacional de sistemas de transporte requer que as matrizes OD sejam dinâmicas, confiáveis e de fácil e rápida obtenção. Nesse

contexto, os métodos convencionais de estimação de matrizes OD não são eficazes, devido às dificuldades (altos custos e demora) no seu processo de obtenção e devido ao caráter estático de seus dados, que não permite representar a variabilidade do comportamento dos deslocamentos.

Atualmente, pouco se sabe sobre os desejos de deslocamento na Região Metropolitana de Fortaleza. O último grande esforço para o entendimento desses deslocamentos foi a pesquisa domiciliar realizada em 1996, no escopo do projeto do metrô de Fortaleza. Desde então, pouco tem sido feito para a obtenção de uma compreensão mais acurada das relações entre uso do solo, deslocamentos e utilização da oferta de transportes. Diante do exposto, somando-se ainda a limitação dos recursos disponíveis, acredita-se que o método de estimação de matriz OD sintética a partir de contagens volumétricas seja uma ferramenta viável e eficiente, capaz de prover subsídios para uma melhor compreensão dos deslocamentos realizados e, conseqüentemente, para um melhor gerenciamento operacional do tráfego.

A implantação desse método no gerenciamento do tráfego na região monitorada pelo CTAFOR é viável devido à facilidade de obtenção dos dados de contagens volumétricas. Para realizar o controle operacional do tráfego, o CTAFOR possui um subsistema de controle centralizado de semáforos que realiza a otimização semaforica em tempo real. Essa otimização é feita a partir de uma malha de detectores, instalados nas aproximações das interseções semaforizadas, que coleta e armazena informações de demanda veicular constantemente em uma parte significativa da malha viária principal da cidade de Fortaleza.

A Figura 1.1 ilustra a idéia central desta pesquisa de dissertação. Na realidade, a variação espacial e temporal dos fluxos de tráfego em uma rede é reflexo da variação no comportamento de deslocamentos realizados, ou seja, os fluxos de tráfego são uma conseqüência do padrão de deslocamento da população. O objetivo desta pesquisa é, portanto, realizar o caminho inverso do que ocorre na realidade, usufruindo das vantagens em possuir uma central de controle de tráfego em tempo real, que armazena informações de fluxos continuamente.

Espera-se, deste modo, que, com a implantação desse método, seja possível estimar matrizes OD para diversos horários, possibilitando, assim, o conhecimento do comportamento dinâmico dos deslocamentos da região abrangida pelo sistema,

permitindo intervenções em tempo real, caracterizando o CTAFOR como um verdadeiro Sistema Inteligente de Transporte (ITS) e melhorando o gerenciamento do tráfego urbano na região controlada por esse sistema. Como benefício da utilização dos dados obtidos a partir dessa ferramenta, podemos citar, por exemplo, o uso dos dados de deslocamentos para alimentar modelos de simulação do tráfego.

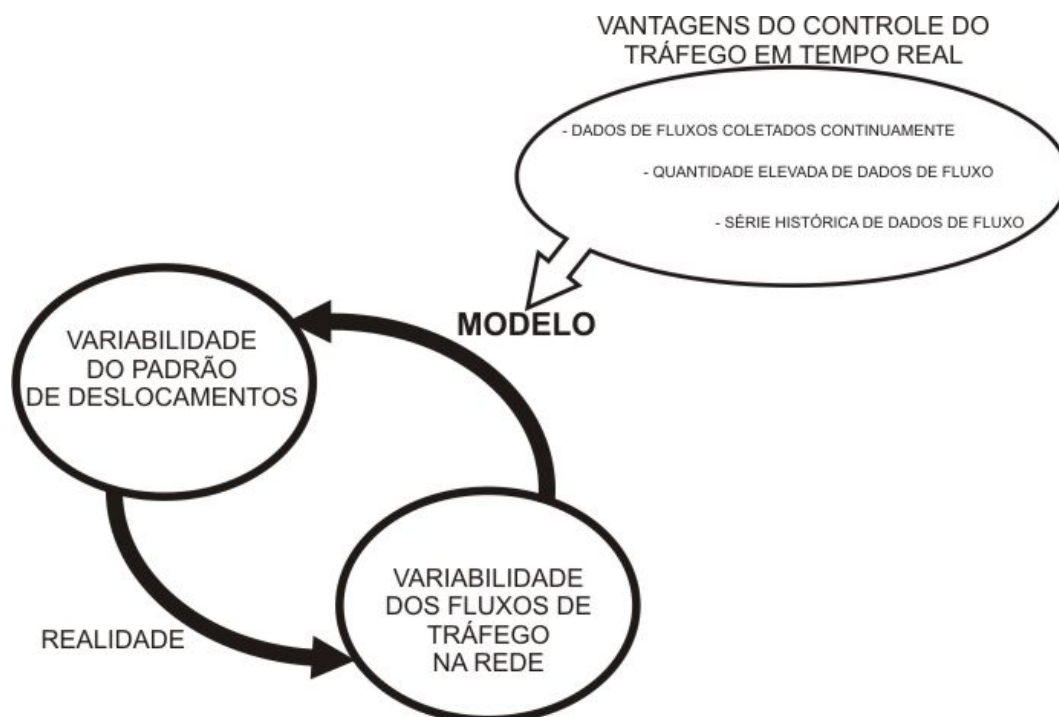


Figura 1.1: Idéia central da pesquisa

1.3 OBJETIVOS DA PESQUISA

1.3.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo principal estimar matrizes de origem e destino com base em contagens volumétricas do fluxo de tráfego do transporte individual motorizado, obtidas a partir do controle em tempo real do tráfego.

1.3.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos da pesquisa, tem-se:

- a. Realizar uma revisão bibliográfica dos principais modelos de estimação de matriz OD a partir de contagens volumétricas, identificando na literatura estudos que tenham avaliado esses modelos;
- b. Caracterizar a região de estudo de caso quanto ao uso do solo, à oferta do sistema viário e à operação do tráfego veicular;
- c. Obter uma matriz OD da região de estudo de caso do transporte individual motorizado para uma determinada hora de pico de um dia útil, utilizando métodos tradicionais de coleta;
- d. Calibrar e validar o modelo escolhido de estimação de matrizes OD a partir de contagens volumétricas para a região de estudo de caso;
- e. Fazer uma análise de sensibilidade dos dados de saída do modelo adotado a partir da variação da qualidade dos dados de entrada, identificando a eficiência do modelo para as situações analisadas;
- f. Avaliar a variabilidade das demandas estimadas para diferentes períodos do tráfego e ao longo de dias típicos de meses típicos.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação está estruturada em cinco capítulos, incluindo este introdutório, no qual é destacado o problema de pesquisa e os objetivos. No Capítulo 2, é apresentada a revisão bibliográfica sobre os principais métodos sintéticos de estimação de matrizes a partir de contagens volumétricas, focando no desenvolvimento dos métodos que utilizam em sua formulação a teoria da maximização da entropia. Por fim, neste capítulo são apresentadas as formulações matemáticas implantadas nos aplicativos QueensOD e TransCAD.

Na seqüência, considerando que o método de estimação sintético será aplicado em uma área de estudo de caso, representativa de toda a região controlada em tempo real pelo CTAFOR, o Capítulo 3 apresenta a caracterização dessa área, incluindo a caracterização de suas demandas de deslocamento, obtidas a partir de um

método tradicional de pesquisa, e que foram utilizadas na avaliação das estimativas sintéticas de matrizes OD realizadas.

No Capítulo 4, é descrito todo o processo metodológico realizado neste estudo para estimar matrizes OD a partir de contagens volumétricas, abordando as principais particularidades do método utilizado. Por fim, no Capítulo 5, são apresentadas as principais conclusões deste trabalho, além de recomendações para trabalhos futuros relacionados ao mesmo problema de pesquisa.

CAPÍTULO 2

MÉTODOS DE ESTIMAÇÃO DE MATRIZES ORIGEM/DESTINO

Neste capítulo, inicialmente, será apresentada uma breve descrição dos principais métodos tradicionais de estimação de matrizes OD, sendo discutidas as particularidades da utilização destes. Em seguida, inicia-se a discussão sobre os métodos de estimação sintética de matrizes baseados em contagens do fluxo de tráfego, apresentando as facilidades e os problemas inerentes à utilização desses métodos, como também um histórico das principais formulações matemáticas propostas. Por fim, são apresentadas as formulações matemáticas implantadas nos pacotes computacionais do QueensOD e TransCAD.

2.1 MÉTODOS TRADICIONAIS DE OBTENÇÃO DE MATRIZES OD

Os métodos tradicionais são caracterizados por realizarem a estimação da matriz OD a partir de pesquisas amostrais, nas quais a origem e o destino de um deslocamento são definidos a partir de entrevistas realizadas em domicílio, no emprego e ao longo da rede viária, ou a partir de pesquisa de leitura de placas (HELLINGA,1994). Após a obtenção da matriz OD amostral, realiza-se a expansão desta, a fim de obter uma matriz que represente os deslocamentos de toda a população.

2.1.1 Pesquisa Domiciliar

A pesquisa domiciliar consiste, basicamente, na realização de entrevistas nas quais os moradores dos domicílios, pertencentes à amostra, são questionados sobre as características das viagens realizadas dentro da área de estudo. Durante a entrevista, são coletados ainda os dados socioeconômicos dos entrevistados, permitindo, deste modo, registrar as demandas de deslocamento em conjunto com o perfil socioeconômico da população (ANTP, 1997).

Neste tipo de pesquisa, em termos práticos, o domicílio é definido como a unidade amostral básica, a partir do qual se tem uma amostragem dos indivíduos e das viagens realizadas (ANTP, 1997). A definição precisa do conjunto de domicílios que comporão a amostra é fundamental para a obtenção de resultados representativos de toda a população e está sujeita aos objetivos e ao nível de precisão da pesquisa e da variação do comportamento da população. Normalmente, essa amostragem é feita por zona de tráfego, que representa a unidade-base de análise dos deslocamentos realizados, utilizando-se a Equação 2.1 como referência para determinar o tamanho da amostra.

$$n = \left(\frac{\sigma \cdot Z}{E} \right)^2 \quad (2.1)$$

em que,

n: tamanho da amostra;

σ : desvio padrão da população;

E: erro amostral;

Z: parâmetro da curva normal referente ao nível de significância.

Utilizando essa equação em um exemplo hipotético, no qual o objetivo é estimar a produção de viagens de uma zona de tráfego com coeficiente de variação em torno de 1,0 e especificando um nível de significância de 95% e erro amostral de 5%, teremos que selecionar, a partir dos domicílios escolhidos para compor a amostra, aproximadamente 1.500 indivíduos. Percebe-se, deste modo, que a pesquisa domiciliar requer amostras com uma grande quantidade de observações, demandando um planejamento cuidadoso na sua realização.

A Tabela 2.1, adaptada de ORTÚZAR e WILLUMSEN (1994), apresenta os valores recomendados do tamanho da amostra em função do tamanho da população, mas que, segundo esses mesmos autores, não são usados na prática. Para a cidade de Fortaleza, por exemplo, que possui aproximadamente 2,2 milhões de habitantes (IBGE, 2006), seria recomendado selecionar uma amostra com 88.000 habitantes ou, no mínimo, com 22.000 habitantes.

Tabela 2.1: Tamanhos de amostras recomendado e mínimo em pesquisas domiciliares em função da população

População (habitantes)	Tamanho da amostra	
	Recomendado	Mínimo
< 50.000	20,0%	10,0%
50.000 – 150.000	12,5%	5,0%
150.000 - 300.000	10,0%	2,8%
300.000 - 500.000	6,7%	2,0%
500.000 - 1.000.000	5,0%	1,4%
> 1.000.000	4,0%	1,0%

Tão importante quanto a definição da amostra é a elaboração do questionário a ser aplicado durante a entrevista. Segundo ORTÚZAR e WILLUMSEN (1994), esse questionário deve ser sucinto, direto e facilmente compreendido pelo entrevistado, com poucas questões subjetivas, devendo ser aplicado apenas nos moradores com mais de cinco anos de idade. Moradores entre cinco e doze anos de idade são considerados de forma indireta, cabendo ao responsável responder as questões durante a entrevista (ORTÚZAR e WILLUMSEN, 1994). A seguir são apresentados os principais dados coletados durante a entrevista domiciliar:

Dados referentes às viagens: endereço de origem e de destino das viagens; horário de início e de término da viagem; motivos da viagem; modos de transportes utilizados; tempo de acesso aos modos de transportes, etc;

Dados socioeconômicos: sexo, idade, escolaridade, ocupação, renda individual, posse de automóvel particular, etc;

Outros dados: endereços dos locais de emprego e de estudo do entrevistado.

A Tabela 2.2 traz algumas observações importantes sobre a realização da pesquisa domiciliar que, apesar de ser uma das pesquisas mais caras e difíceis de serem executadas, é a que oferece, segundo ORTÚZAR e WILLUMSEM (1994), a maior quantidade de informações sobre os deslocamentos realizados. Além de estimar os fluxos de deslocamentos da matriz OD, o banco de dados obtido com a pesquisa domiciliar permite a realização de análises complexas acerca do comportamento dos viajantes frente às escolhas ligadas às viagens (LÓPEZ-REYES e KAWAMOTO, 2001), como também a calibração de modelos de geração de viagens que são úteis para estimar o comportamento futuro da demanda.

Tabela 2.2: Observações sobre a pesquisa domiciliar

Item	Observações
Recursos necessários	Bases cartográficas do sistema viário, do transporte coletivo, do uso e ocupação do solo, dos setores censitários e dos limites municipais e distritais; cadastro de domicílio; dados censitários; guias de ruas; Questionário da pesquisa; Equipe de planejamento da pesquisa para definição de zoneamento, questionários, manuais de procedimento, treinamento das equipes de campo, controle da pesquisa, tabulação e avaliação/análise dos resultados.
Custo aproximado	Entre R\$ 15,00 e R\$30,00 por domicílio, variando em função do tamanho da cidade (em 1997).
Prazos de estudos	Proporcionais à área de pesquisa, podendo variar de meses a 1 ano.
Resultados esperados	Banco de dados, atualizado periodicamente, sobre a demanda de viagens diárias na área urbana, relativos a modo, motivo, duração, horário, origem e destino.

Fonte: ANTP (1997)

2.1.2 Pesquisa com Entrevista no Emprego

Metodologicamente semelhante à pesquisa domiciliar, tem-se a pesquisa com entrevista no emprego, que é normalmente utilizada em estudo de menor porte em que se pretende analisar o comportamento do deslocamento de pequenas regiões ou de forma complementar à pesquisa domiciliar. Nesta pesquisa, algumas empresas inseridas na região de estudo são selecionadas, cabendo aos seus funcionários responder um questionário semelhante ao elaborado na pesquisa domiciliar.

2.1.3 Pesquisa de Diário de Viagens

A pesquisa de diário de viagens pode ser utilizada de forma alternativa ou complementar à pesquisa domiciliar. Nesta pesquisa, o indivíduo selecionado para compor a amostra é encarregado de preencher um diário com as informações dos diversos deslocamentos realizadas por ele em um determinado dia. ORTÚZAR e WILLUMSEN (1994) classificam esta pesquisa como sendo um tipo especial de pesquisa domiciliar, pois ela possibilita obter o mesmo conjunto de dados, entretanto com um maior nível de detalhe.

O principal problema deste método de pesquisa refere-se à demora no preenchimento do diário, que interfere consequentemente no comprometimento do entrevistado em registrar, com precisão, todas as informações das atividades realizadas. Segundo OHMORI *et al.* (2006), a maioria dos entrevistados tende a preencher o diário de atividades apenas durante a noite, quando voltam pra casa, prejudicando a qualidade dessas informações, principalmente quanto ao horário de início e de término das atividades realizadas.

No Brasil, foram encontrados poucos registros da aplicação desse método de pesquisa. Pode-se destacar o trabalho de ARRUDA e SILVA (2004) que avaliou os principais avanços deste tipo de pesquisa em âmbito internacional e apresentou os resultados encontrados de sua aplicação na cidade de São Carlos, São Paulo.

Por fim, pode-se destacar como avanço desse método de pesquisa a utilização de equipamentos eletrônicos no preenchimento do formulário de pesquisa como descrito nos trabalhos de GUENSLER e WOLF (1999) e de OHMORI *et al.* (2006). O objetivo desses trabalhos foi desenvolver um sistema de preenchimento automático do diário de atividades e um de captura de posicionamento via GPS. No trabalho de OHMORI *et al.* (2006) os sistemas foram implementados em telefones celulares facilitando consideravelmente a coleta dos dados.

2.1.4 Pesquisa de Placas

Nos métodos até aqui descritos, a matriz OD é obtida de forma indireta a partir da declaração espontânea dos usuários pertencentes à amostra sobre os seus deslocamentos. Na pesquisa de placa, a matriz OD é observada em campo diretamente, a partir do registro das placas que trafegam nas diversas estações de observação, espalhadas ao longo de toda a área de estudo. A definição dos locais das estações de observação é feita a partir do zoneamento proposto e deve cobrir, no mínimo, as principais entradas e saídas das zonas de tráfego.

Normalmente, o registro das placas é feito de forma amostral, devido à dificuldade em se registrar manualmente todas as placas dos veículos que trafegam por uma estação de observação. Os critérios para definir os veículos que comporão a amostra são diversos, podendo ser, por exemplo, a cor dos veículos (todos os veículos de cor preta) ou o valor do último número da placa (todos os veículos com placa terminando com o número 2). É importante destacar ainda que, devido à dificuldade no

registro das placas, apenas uma parte dos dígitos das placas deve ser anotada. Uma sugestão seria anotar apenas os dígitos numéricos. Um problema que pode ocorrer devido ao registro parcial da placa é o surgimento de registros ambíguos, que ocorrerá quando dois veículos diferentes possuírem o mesmo registro parcial da placa (VAN DE ZIJPP, 1997).

Após o fim do período de observação, as placas registradas nas diferentes estações de observação são utilizadas para compor o caminho realizado pelos veículos e, conseqüentemente, as suas origens e destinos, como ilustrado de forma simplificada na Figura 2.1, adaptada de HELLINGA (1994).

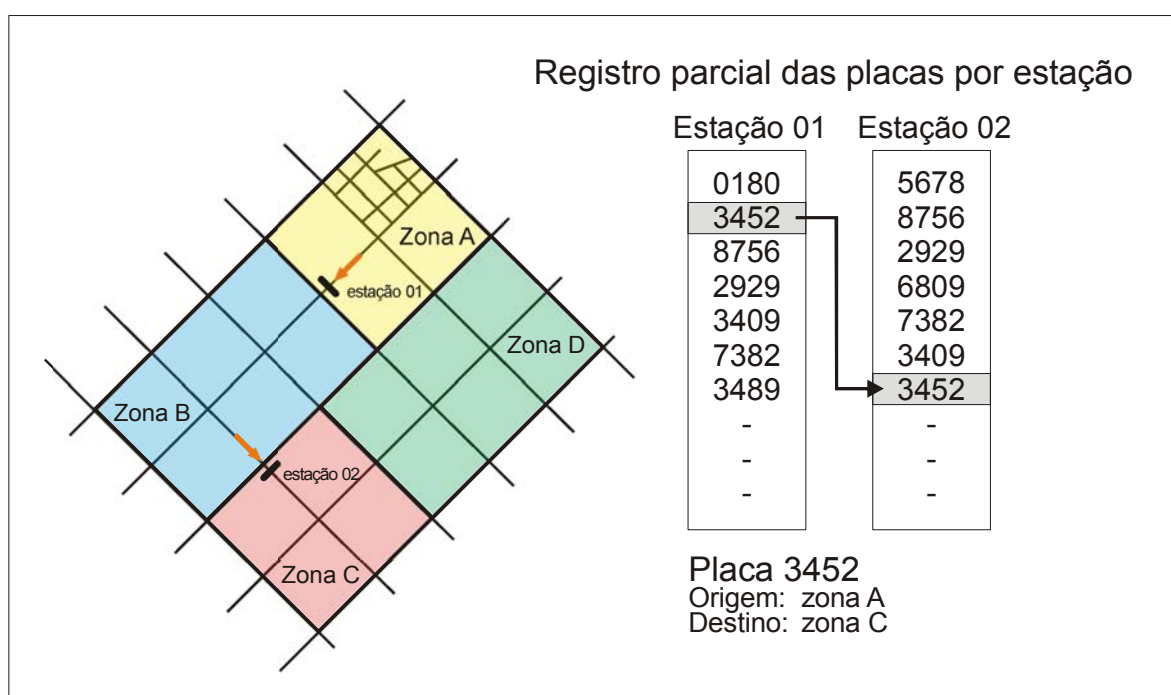


Figura 2.1: Esquema da pesquisa amostral de placa para estimar a matriz OD, adaptada de HELLINGA (1994)

Pode-se destacar, como principais vantagens na utilização desse método, em relação aos métodos descritos, o baixo custo na sua realização e o menor tempo na compilação dos dados e, conseqüentemente, na obtenção da matriz OD. Como desvantagens, destacam-se a impossibilidade de associar as demandas de viagens com dados socioeconômicos ou com os motivos de viagem e a existência de diversas fontes de erro que podem comprometer a qualidade da matriz OD obtida. Essa última desvantagem, entretanto, pode ser minimizada se os registros dos veículos nas

estações de observação forem realizados com o auxílio de câmera de vídeos ou a partir de equipamentos de identificação automática de veículos.

A identificação automática por rádio-freqüência vem ganhando destaque nos últimos anos. Neste caso, os veículos são equipados com dispositivo eletrônico que emite uma freqüência, que é captada por antenas leitoras instaladas em diversos pontos da cidade. A vantagem na utilização dessa tecnologia, além de facilitar a coleta dos dados, é a de permitir a obtenção de matrizes OD populacionais e não mais amostrais, visto a possibilidade de registrar todos os veículos. No Brasil, o Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN) atentando para as vantagens na utilização da identificação automática, instituiu, em todo território nacional, a partir da Resolução N° 212 de 2006, o Sistema Nacional de Identificação Automática de Veículos - SINIAV, baseado em tecnologia de identificação por rádio-freqüência. Segundo o CONTRAN, a adoção desse sistema visa atender à necessidade de empreender a modernização e a adequação tecnológica dos equipamentos e procedimentos empregados nas atividades de prevenção, fiscalização e repressão ao furto e roubo de veículos e cargas, bem como a necessidade de dotar os órgãos executivos de trânsito de instrumentos modernos para planejamento, fiscalização e gestão do trânsito e da frota de veículos.

2.1.5 Outras Pesquisas Importantes

Com o intuito de validar e expandir os dados de demanda obtidos a partir dos métodos tradicionais descritos, algumas pesquisas complementares podem ser realizadas. Dentre estas, destacam-se a pesquisa de linha de contorno, linha imaginária que delimita a área de estudo, e a pesquisa de linha divisória ou linha de aferição (*screenlines*), linha imaginária que divide internamente a área de estudo.

A pesquisa de linha de contorno é efetuada nos principais pontos de entrada e saída da área de estudo e tem como objetivo principal determinar o padrão de deslocamentos das viagens externas a essa área, a partir do conhecimento dos volumes nestes pontos e de outras informações sobre essas viagens. Já a pesquisa de linha divisória ou de aferição é realizada em pontos internos da área de estudo. Normalmente, nesses pontos são coletados apenas dados de volume, que são utilizados para aferir as informações das viagens obtidas a partir de uma pesquisa domiciliar, por exemplo. Eventualmente, são obtidas outras informações sobre as

viagens realizadas. Nesta pesquisa, as linhas imaginárias são definidas sobre barreiras físicas como rios, vias férreas e rodovias e as contagens volumétricas são realizadas nos pontos onde é possível cruzá-las.

As informações sobre as viagens coletadas nestas pesquisas são obtidas a partir de entrevistas realizadas ao longo das vias. Nestas entrevistas são aplicados questionários simplificados, abrangendo essencialmente informações referentes à viagem que está sendo realizada, no momento da entrevista, como: origem, destino, motivo da viagem e modo utilizado (LIDAS, 2007).

2.2 MÉTODOS SINTÉTICOS DE ESTIMAÇÃO DE MATRIZ OD A PARTIR DE CONTAGENS VOLUMÉTRICAS

Os métodos sintéticos de estimação de matrizes OD a partir de contagens volumétricas vêm sendo desenvolvidos no decorrer das últimas quatro décadas (ABRAHAMSSOM, 1998; VAN AERDE *et al.*, 2003) a partir do trabalho pioneiro de ROBILLARD (1975). Estes métodos podem ser interpretados como o inverso das técnicas de alocação de tráfego (BERTONCINI, 2007), pois ao invés de obterem os dados de fluxos ao longo da rede a partir da alocação de uma matriz OD, eles buscam obter (estimar) uma matriz OD que, quando alocada na rede, reproduza os dados de fluxo observados (ABRAHAMSSOM, 1998). Percebe-se, deste modo, o significado do emprego da palavra “sintético” que se refere à síntese e está relacionado com o processo que resume ou reúne as diversas partes constituintes de um todo (WIKIPÉDIA, 2007). No contexto da utilização dos métodos sintéticos, as “partes” seriam os dados de fluxo de tráfego observados na rede e o “todo” seria a matriz OD a ser estimada.

O desenvolvimento desses métodos ao longo das últimas décadas sempre buscou complementar ou substituir a estimação realizada pelos métodos tradicionais que, como descrito, apresentam uma série de desvantagens, destacando, dentre elas, a quantidade de tempo, recursos humanos e financeiros despendidos na sua realização. A função da utilização dos métodos sintéticos é, portanto, suprimir essas desvantagens por meio da utilização de informações de fluxo de tráfego ao longo da rede viária que, como descrito por ORTÚZAR e WILLUMSEN (1994), é uma fonte de dados bastante atrativa, visto que sua obtenção é realizada com custos relativamente baixos, podendo ser feita de forma automática e requerendo pouca quantidade de

recursos humanos, como no caso de redes monitoradas por uma central de controle de tráfego.

Apesar da existência de diversos estudos que abordam essas técnicas, DEMARCHI e BERTONCINI (2004) citam que tais métodos não são conhecidos e amplamente utilizados por parte dos pesquisadores e analistas de sistema de transporte, não só aqui no Brasil como também no exterior. VAN AERDE *et al.* (2003) mencionam que os motivos que contribuem para isso são, além do próprio desconhecimento mais detalhado da base teórica dos métodos, as dificuldades práticas encontradas no processo de estimativa das demandas entre os pares OD.

2.2.1 Dificuldades Associadas aos Métodos Sintéticos de Estimação

Apesar de poderem ser interpretados como um processo inverso às técnicas de alocação do tráfego, os métodos sintéticos de estimação de matrizes OD são mais complexos do que estas técnicas. Na alocação, a matriz OD já está definida, sendo possível representar a forma como os usuários determinam as suas rotas a partir de modelos simples, que combinem em sua formulação variáveis como tempo de viagem e custo monetário (ORTÚZAR e WILLUMSEN, 1994). Já nos métodos sintéticos, os dados de fluxo do tráfego estão disponíveis, sendo necessário representar qual padrão de deslocamento originou essa configuração de fluxos. Entretanto, qual modelo representa de forma satisfatória esse padrão de deslocamento? Sob a luz desse questionamento é que surge o principal problema teórico relacionado com o método sintético de estimação de matrizes OD a partir de contagens volumétricas. TURNQUIST e GUR (1979), WILLUMSEN (1984), RAKHA *et al.* (1998a), ABRAHAMSSOM (1998), entre outros autores, citam que, a partir de um mesmo conjunto de dados de fluxo do tráfego, existe a possibilidade de obtenção de múltiplos resultados para a matriz OD, ou seja, há mais de uma matriz OD que reproduz os fluxos de tráfego observados na rede. Diante do exposto, qual será a solução que melhor se adequará ao padrão de deslocamento realizado?

A possibilidade de múltiplas soluções para a matriz OD existe, pois no problema de estimação é necessário resolver um sistema de equações que relacionam fluxos e viagens no qual o número de incógnitas é, em geral, maior que o número de equações (DEMARCHI e BERTONCINI, 2004), ou seja, a quantidade de pares OD da matriz a ser estimada, normalmente, excede o número de pontos com

informações de fluxo do tráfego, tornando o problema indeterminado. A partir da rede hipotética adaptada de RAKHA *et al.* (1998a) e apresentada na Figura 2.2, é possível entender o problema em questão.

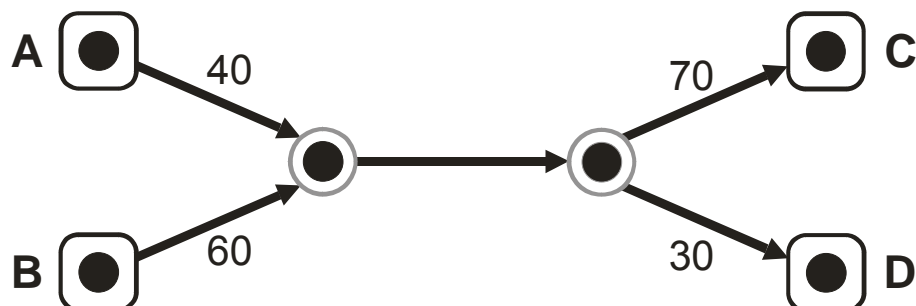


Figura 2.2: Rede hipotética para descrever a possibilidade de múltiplas soluções, adaptada de Rakha *et al.* (1998a)

Considere, nessa rede, que os pontos A e B são zonas de origens e os pontos C e D são zonas de destinos e que, juntos aos arcos, têm-se as informações de fluxo de tráfego. Como apresentado na Tabela 2.3, é possível representar as demandas de viagens em função de apenas uma, neste caso a demanda entre A e C (T_{AC}). Percebe-se que T_{AC} poderá assumir valores entre 10 e 40 ($10 \leq T_{AC} \leq 40$), caso contrário serão obtidos valores negativos para as demandas. Deste modo, T_{AC} poderá assumir 31 valores diferentes, considerando, obviamente, apenas valores inteiros para as demandas, implicando em 31 soluções possíveis para a matriz OD. Em uma outra rede hipotética, apresentada na Figura 2.3, onde foi adicionado mais um arco e uma zona de destino (ponto E), 751 soluções podem ser encontradas para a matriz OD, mostrando como o número de soluções tende a aumentar consideravelmente com o aumento da complexidade da rede.

Tabela 2.3: Representação da Matriz OD em função da demanda entre A e C para a rede hipotética

Origem/Destino	C	D	Total
A	T_{AC}	$40 - T_{AC}$	40
B	$70 - T_{AC}$	$T_{AC} - 10$	60
Total	70	30	100

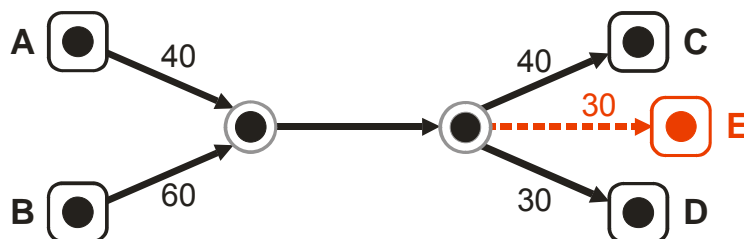


Figura 2.3: Rede hipotética para descrever a possibilidade de múltiplas soluções

Utilizando ainda a rede hipotética da Figura 2.3, entretanto gerando uma nova configuração de fluxos de tráfego como pode ser observado na Figura 2.4, percebe-se ainda mais a complexidade do problema em se determinar a matriz OD mais adequada. Nesta rede, foram extraídas as informações de fluxos de dois arcos e a quantidade de soluções possíveis da matriz OD aumentou para 32.726.

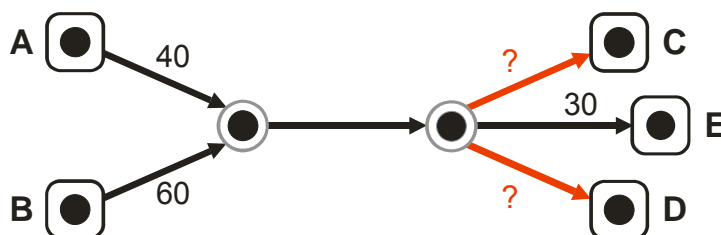


Figura 2.4: Rede hipotética para descrever a possibilidade de múltiplas soluções

Outro problema relacionado com os métodos sintéticos de estimação de matrizes OD a partir de contagens volumétricas é que o conjunto de informações de fluxo do tráfego pode ser internamente inconsistente, implicando na inexistência de uma matriz OD que quando alocada na rede reproduza fielmente os fluxos de tráfego observados (TURNQUIST e GUR, 1979). ABRAHAMSSOM (1998) cita duas possíveis fontes para a ocorrência dessa inconsistência. A primeira fonte refere-se à inconsistência originada durante a obtenção dos dados de fluxo do tráfego. Normalmente, as pesquisas volumétricas não são executadas no mesmo dia e não estão livres de erros durante a sua realização. Neste caso, a soma dos fluxos de entrada em um determinado nó poderá ser diferente dos fluxos de saída, implicando uma descontinuidade nos fluxos do tráfego. A segunda fonte de inconsistência está relacionada com o fato de a rede codificada (simulada) ser uma abstração da rede

real. Neste caso, apesar de os dados volumétricos em toda a rede real serem transferidos para a rede abstrata, este processo não eliminará por completo a inconsistência dos dados de fluxos. Uma representação precisa da rede real deve minimizar esse problema.

Uma outra fonte de inconsistências dos dados de volumes, citada por TURNQUIST e GUR (1979), assim como ORTÚZAR e WILLUMSEN (1994), refere-se às lógicas de alocação do tráfego utilizadas, que se baseiam na premissa de que as viagens entre um determinado par OD são realizadas nos caminhos com menor impedância. Esta premissa, apesar de ser plausível, não é uma representação precisa do mundo real (TURNQUIST e GUR, 1979). Um modelo de alocação pode não alocar viagens em um determinado arco da rede que tenha dados de fluxo observado (apesar de pequeno) e, deste modo, não será possível reproduzir os dados de fluxo observados utilizando este modelo (ORTÚZAR e WILLUMSEN, 1994).

É importante destacar que o problema de inconsistência dos dados de volume não é exclusivo dos métodos sintéticos de estimação. Nos métodos tradicionais, normalmente, a calibração do modelo de alocação é realizada comparando os volumes observados e os alocados e, deste modo, um conjunto de dados com problema de continuidade, uma rede mal representada ou uma alocação pouco precisa implicará, conseqüentemente, na inconsistência dos dados de volume.

A partir da Figura 2.5, adaptada de ORTÚZAR e WILLUMSEN (1994), é possível ilustrar alguns dessas fontes de inconsistência. Nesta figura, de modo semelhante à Figura 2.2, os pontos A e B são zonas de origens, os pontos C e D são zonas de destinos e, juntos aos arcos, têm-se as informações de fluxo de tráfego. Considere a situação em que X assumo o valor de 80 veículos/hora. Neste caso, a soma dos fluxos de entrada no nó 6 será igual 150 veículos/hora (fluxos dos arcos 1-6 e 2-6) e a soma dos fluxos de saída será 160 veículos/hora (fluxo dos arcos 6-3 e 6-4), não havendo, portanto, continuidade dos fluxos de tráfego. Considere agora a situação em que X assumo o valor de 70 veículos/hora e que o modelo de alocação definiu as rotas apresentadas na Figura 2.5b. Neste caso, apesar de haver continuidade dos fluxos de tráfego no nó 6, visto que os fluxos de entrada e saída são equivalentes, a inconsistência ainda existe. Percebe-se que as rotas definidas pelo modelo são incompatíveis com esta nova configuração de fluxos. Nenhuma matriz reproduzirá o fluxo de 80 veículos/hora no arco 6-3, pois o único deslocamento que utiliza este arco,

segundo a alocação apresentada, é realizado entre o par OD B-C que possui a demanda limitada pelo arco 2-6 em 50 veículos/hora.

Percebe-se, diante do exposto, que para a estimação de matrizes OD a partir dos métodos sintéticos, baseados em contagens volumétricas, são necessárias, além dos dados de fluxo do tráfego, informações precisas das rotas utilizadas entre os diversos pares OD. Essa observação se torna ainda mais relevante no caso de redes congestionadas, onde existirá mais de uma rota utilizada nos deslocamentos realizados. HELLINGA (1994) destaca que, além de definir as rotas utilizadas, é necessário definir também a proporção das demandas que utilizam cada rota.

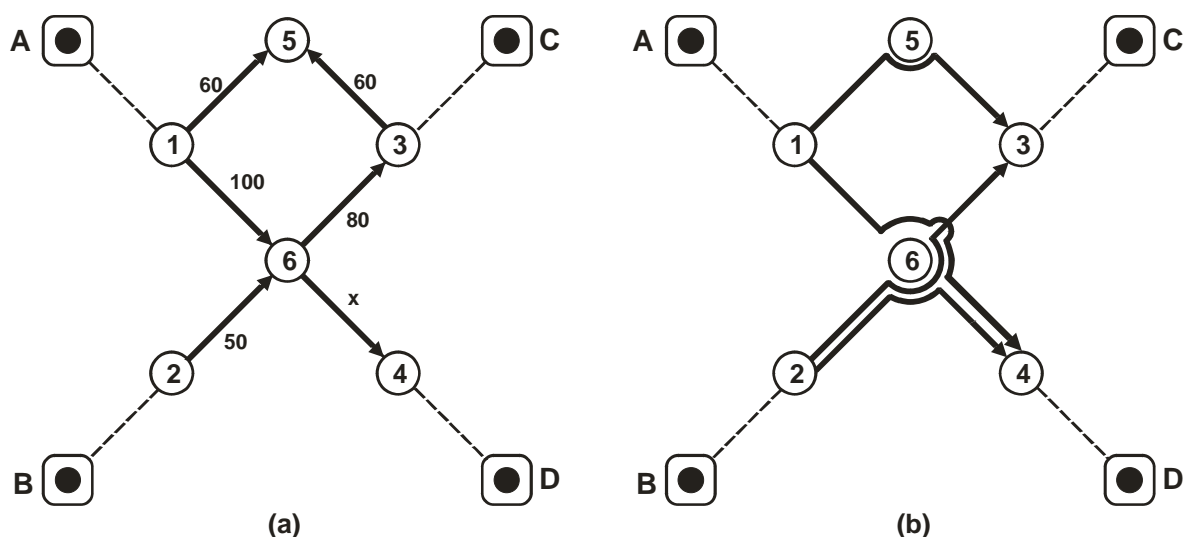


Figura 2.5: Exemplo de inconsistência de fluxos, adaptada de Ortúzar e Willumsen (1994)

Por fim, destacam-se os três problemas teóricos e práticos que podem ser encontrados durante o processo de estimação de matrizes OD a partir de contagens volumétricas. Em síntese, o primeiro desses problemas é que, teoricamente, é possível obter múltiplos resultados para as matrizes OD a partir de um mesmo conjunto de dados de fluxos, sendo necessário determinar, dentre essas possíveis soluções, qual é a mais adequada. O segundo problema se refere ao fato de que, na prática, normalmente não há continuidade dos fluxos de tráfego nos nós, implicando na não existência de uma matriz OD que replique exatamente os fluxos observados. O terceiro problema existente está associado ao desconhecimento das rotas utilizadas entre os pares OD (RAKHA *et al.*, 1998a).

2.2.2 Formulações Propostas

Visando à superação dos entraves, apresentados no tópico anterior, diversos estudos foram desenvolvidos, propondo formulações matemáticas e algoritmos de solução. Inicialmente, esses estudos limitaram o desenvolvimento de métodos sintéticos de estimação apropriados para os objetivos do planejamento de transporte de longo prazo. Entretanto, com a necessidade de aprimorar o gerenciamento das infra-estruturas de transporte, esses métodos passaram a dar ênfase à estimação das demandas OD que pudessem ser utilizadas em análises operacionais do tráfego (HELLINGA, 1994), como no caso da estimação de matrizes OD dinâmicas.

ABRAHAMSSOM (1998) classifica essas formulações em dois grupos: as que se baseiam em conceitos de modelagem do tráfego e as que utilizam técnicas de inferência estatística para estimar, dentro do universo possível de soluções, a matriz OD. Na primeira categoria estão as formulações que combinam modelos de demanda de viagens, como no trabalho desenvolvido por ROBILLARD (1975), e as que incluem princípios de maximização da entropia e minimização da quantidade de informação, como em WILLUMSEN (1978) e VAN ZUYLEN e WILLUMSEM (1980). Segundo ABRAHAMSSOM (1998), nessas formulações assume-se que o comportamento de deslocamento pode ser representado, direta ou indiretamente, por algum modelo de distribuição de viagem. Na segunda categoria estão as formulações que utilizam princípios de maximização da verossimilhança (SPIESS, 1987) e mínimos quadráticos (CASSETTA, 1984; BELL, 1991).

Na formulação proposta por ROBILLARD (1975), a estimação da matriz OD é feita com o auxílio do modelo gravitacional, sendo utilizado um modelo de alocação proporcional, no qual a definição das rotas utilizadas foi realizada em uma etapa anterior ao processo de estimação da matriz OD. Nesse trabalho, e de forma análoga aos trabalhos desenvolvidos por HÖBERG (1976), HOLM (1976), WILLS (1986) e TAMIN e WILLUMSEN (1989), o problema de múltiplas soluções (associado ao método sintético) é minimizado a partir de uma restrição do espaço de soluções feito com o auxílio de algum modelo de demanda de viagens. WILLS (1986) sugeriu, por exemplo, em seu modelo que a estrutura da matriz OD a ser estimada fosse obtida a partir de um modelo de demanda de viagens que combinasse características do modelo gravitacional e do modelo de oportunidades intervenientes.

A teoria de maximização da entropia foi proposta por WILSON (1970), sendo incorporada pela primeira vez no processo de estimação de matrizes OD por WILLUMSSEN (1978). A premissa desta teoria é que a matriz OD com maior entropia será também a matriz OD com maior probabilidade de ocorrer ou de ser observada em campo. Deste modo, WILLUMSSEN (1978) estimou a matriz OD mais provável a partir da maximização da entropia e de um conjunto de restrições de fluxo do tráfego como apresentado a seguir nas Equações 2.2, 2.3, 2.4 e 2.5. Na utilização dessa formulação, alguns pré-requisitos foram necessários, como a existência da continuidade dos fluxos de tráfego e o conhecimento prévio da utilização das rotas entre um par OD.

$$\text{MAXIMIZAR } S(T_{ij}) = \frac{T!}{\prod_{ij} T_{ij}!} \quad (2.2)$$

sujeito a:

$$V_a = \sum_{ij} T_{ij} \cdot p_{ij}^a \quad (2.3)$$

$$T_{ij} \geq 0 \quad (2.4)$$

$$T = \sum_{ij} T_{ij} \quad (2.5)$$

em que,

S: entropia;

T: total de viagens na matriz;

T_{ij} : quantidade de viagens de i para j estimada;

V_a : volume observado (coletado) no arco a ;

p_{ij}^a : proporção das viagens de i para j que utiliza o arco a .

A teoria da maximização da entropia pode ser entendida a partir da descrição da Figura 2.6, adaptada de BERTONCINI (2007). Considere as demandas de viagens como um sistema que pode ser representado por três estados, definidos como macro, meso e micro-estado. O macro-estado é o estado mais agregado e representa a

quantidade total de viagens no sistema, que, neste caso, é igual a quatro, como apresentado na Figura 2.6a. O meso-estado é um estado menos agregado que o anterior e corresponde à distribuição de cada viagem entre cada par OD. O micro-estado é o estado mais desagregado e equivale à distribuição individual de cada viagem entre cada par OD como mostra a Figura 2.6c. É possível concluir, a partir dessa última representação, que existe mais de um micro-estado que reproduzirá o mesmo meso-estado, ou seja, é possível, alternando as viagens individuais da Figura 2.6c, representar o mesmo meso-estado da Figura 2.6b, como apresentado nas matrizes da Figura 2.6d.

Essas diversas representações possíveis para o meso-estado das demandas de viagens é considerada a entropia do sistema. Deste modo, o meso-estado apresentado na Figura 2.6b possui uma entropia igual a quatro. Quanto maior a entropia, maior será a quantidade de micro-estados que uma determinada matriz OD possui e, deste modo, essa matriz terá uma maior probabilidade de ocorrer na realidade. É possível mostrar, a partir do exemplo apresentado a seguir, adaptado de M. VAN AERDE & ASSOC. (2002a) que o número de micro-estados associados a um determinado meso-estado pode ser representado pela Equação 2.2, utilizada na formulação proposta por WILLUMSSEN (1978).

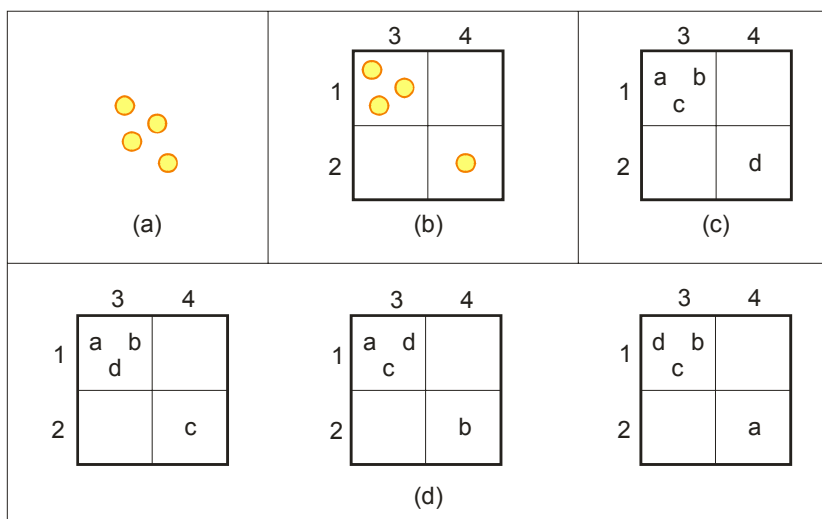


Figura 2.6: Representação da demanda de viagens em três estados: macro-estado (a), meso-estado (b) e micro-estado (c) e (d). Adaptada de BERTONCINI (2007)

Considere ainda que a rede da Figura 2.2 apresenta um total de viagens (T) igual a 100. A partir da Tabela 2.3 é possível obter, dentre as possíveis soluções da

matriz OD, uma matriz em que $T_{AC}=15$, $T_{AD}=25$, $T_{BC}=55$ e $T_{BD}=5$. Existem “n” formas para representar essa matriz (micro-estados) a partir da combinação das 100 viagens existentes, como expresso nas Equações 2.6, 2.7 e 2.8.

$$n = \binom{100}{15} \times \binom{85}{25} \times \binom{60}{55} \times \binom{5}{5} \quad (2.6)$$

$$n = \frac{100!}{15!(100-15)!} \times \frac{(100-15)!}{25!(85-25)!} \times \frac{(85-25)!}{55!(60-55)!} \times \frac{5!}{5!0!} \quad (2.7)$$

$$n = \frac{100!}{15!25!55!5!} = \frac{T!}{\prod_{ij} T_{ij}!} \quad (2.8)$$

Com o intuito de diminuir os esforços computacionais durante o processo de estimação, WILLUMSEN (1978) substituiu a Equação 2.2 pela Equação 2.10, a partir da aproximação apresentada na Equação 2.9.

$$\ln x! = x \ln x - x \quad (2.9)$$

$$\text{MAXIMIZAR } S(T_{ij}) = - \sum_{ij} (T_{ij} \ln T_{ij} - T_{ij}) \quad (2.10)$$

Calculando a entropia de cada solução possível da matriz OD, obtém-se o gráfico da Figura 2.7, em que se tem a entropia de cada solução em função da demanda T_{AC} .

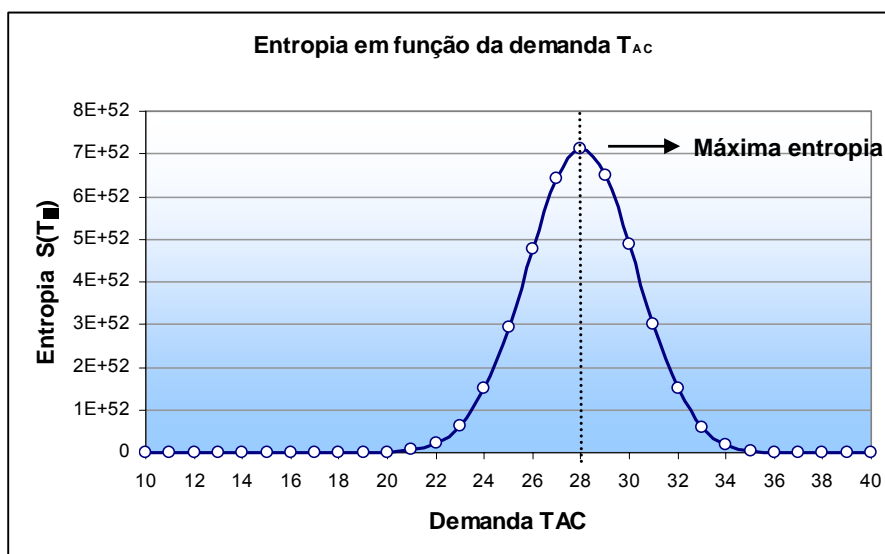


Figura 2.7: Variação da entropia do sistema em função da demanda T_{AC}

Deste modo, aplicando a formulação proposta por WILLUMSSEN (1978) na rede da Figura 2.2, obtém-se a solução apresentada a seguir na Tabela 2.4, na qual o valor da demanda T_{AC} é igual a 28.

Tabela 2.4: Matriz OD de maior entropia

Origem/Destino	C	D	Total
A	28	12	40
B	42	18	60
Total	70	30	100

Destaca-se que, apesar de uma determinada matriz OD ser a mais provável de ocorrer em campo, de acordo com o princípio da entropia proposto por WILSON (1970), não necessariamente ela será a matriz que melhor representará, na realidade, o comportamento de deslocamento de uma população, ou seja, não há nenhuma garantia de que essa matriz estimada será a matriz que ocorrerá realmente em campo.

Seguindo a linha de pesquisa iniciada por WILLUMSEN (1978) tem-se o trabalho de VAN ZUYLEN e WILLUMSEN (1980). A novidade deste trabalho é a tentativa de minimizar os problemas referentes à falta de continuidade dos fluxos de tráfego considerando o comportamento estocástico da variável fluxo do tráfego a partir da técnica de maximização da verossimilhança. Vimos que a continuidade dos fluxos de tráfego é garantida quando a soma dos fluxos de entrada (V_{me}) em um determinado nó (m) da rede é igual à soma dos fluxos de saída (V_{ms}), ou seja, quando a Equação 2.11 é respeitada.

$$\sum_e V_{me} - \sum_s V_{ms} = 0 \quad (2.11)$$

Neste trabalho, VAN ZUYLEN e WILLUMSEN assumiram que a variável fluxo de tráfego, em um determinado arco da rede (a), segue a distribuição de *Poisson* com uma média igual ao fluxo observado (V_a) e que, deste modo, a probabilidade (P) de estimar um valor do fluxo de tráfego igual ' V_a' ' é dada pela Equação 2.12.

$$P(V_a') = \frac{e^{-V_a} \times V_a^{V_a'}}{V_a'!} \quad (2.12)$$

A probabilidade de estimar, portanto, um conjunto de dados de fluxo em uma determinada rede, é dada pela Equação 2.13. Deste modo, o melhor estimador do

conjunto de dados de fluxos observados será o conjunto de dados estimados que maximize a Equação 2.13 sujeita a Equação 2.11.

$$P = \prod_a \frac{e^{-V_a} \times V_a^{V_a}}{V_a!} \quad (2.13)$$

Diversos outros trabalhos também trataram o problema da falta de continuidade dos dados de fluxo do tráfego. CASCETTA (1984), por exemplo, tratou a questão, utilizando também uma abordagem de inferência estatística, entretanto utilizando o método dos mínimos quadrados. Nessa formulação a restrição de volume foi substituída pela Equação 2.14 a ser minimizada.

$$E = \sum_a \left(V_a - \sum_{ij} T_{ij} \cdot p_{ij}^a \right)^2 \quad (2.14)$$

Em que,

E: erro total a ser minimizado.

A solução apresentada por VAN ZUYLEN e WILLUMSEN (1980) para minimizar o problema de inconsistência dos dados de volume foi aplicada em duas formulações. A primeira formulação apresentada no trabalho busca estimar a matriz OD a partir de um princípio similar ao da maximização da entropia e que foi utilizado inicialmente por VAN ZUYLEN (1978) *apud* VAN ZUYLEN e WILLUMSEN (1980). Nesta formulação é utilizado o princípio de minimização da informação proposto por BRILLOUIN (1956) *apud* VAN ZUYLEN e WILLUMSEN (1980). A diferença entre esta formulação e a proposta por WILLUMSEN (1978) é que, no modelo proposto por VAN ZUYLEN, o meso-estado é representado pela contagem de tráfego e não pelas viagens entre os pares OD. Nessa formulação, o problema em estimar a matriz OD consiste em minimizar a Equação 2.15, sujeita às Equações 2.3, 2.4 e 2.5. Outra novidade dessa formulação é a utilização de informações de uma matriz OD já existente para facilitar o processo de estimação, denominada de matriz OD semente.

$$I_a = \sum_a \sum_{ij} T_{ij} p_{ij}^a \log_e \frac{T_{ij} S^a}{V_a t_{ij}} \quad (2.15)$$

$$S^a = \sum_{ij} t_{ij} p_{ij}^a \quad (2.16)$$

em que,

t_{ij} : quantidade de viagens de i para j de uma matriz OD anterior ao processo de estimação (matriz OD semente).

A segunda formulação, apresentada por VAN ZUYLEN e WILLUMSEN (1980) e mais detalhada por WILLUMSEN (1984), difere da formulação inicial proposta por WILLUMSEN (1978) apenas pela incorporação de informações de uma matriz OD semente. Nessa formulação, a equação a ser maximizada pelo modelo é substituída pela Equação 2.17, considerando ainda as restrições definidas pelas Equações 2.3, 2.4 e 2.5.

$$\text{MAXIMIZAR } S(T_{ij}) = \frac{T!}{\prod_{ij} T_{ij}!} \prod_{ij} \left(\frac{t_{ij}}{\sum_{ij} t_{ij}} \right)^{T_{ij}} \quad (2.17)$$

O termo adicionado na Equação (2.17) representa a probabilidade de uma viagem ser realizada entre uma origem e um destino na matriz OD semente. Considera-se, nessa nova formulação, que a probabilidade de ocorrência de uma viagem na matriz semente será igual na matriz a ser estimada. Deste modo, uma determinada demanda entre uma origem i e destino j que tenha uma pequena proporção na matriz semente ($t_{ij}/\sum t_{ij}$), ou seja, baixa probabilidade de ocorrer, tenderá a assumir valores pequenos na matriz estimada. Isto acontece porque quando uma demanda com baixa probabilidade de ocorrer aumenta na matriz OD a ser estimada, o valor da função objetivo tende a assumir valores menores. A matriz que maximiza a função objetivo tenderá, portanto, a assumir valores menores para demandas com baixa probabilidade de ocorrer e, conseqüentemente, valores maiores para demandas com alta probabilidade. O objetivo da utilização de uma matriz-semente é, portanto, melhorar o processo de estimação da matriz OD incorporando informações do padrão de deslocamento realizado. DEMARCHI e BERTONCINI (2004) citam que a utilização de uma matriz semente faz com que as demandas sejam estimadas de forma a manter a proporcionalidade das demandas-sementes em relação ao total de viagens da matriz semente; entretanto, como será visto em seguida, essa constatação vai depender ainda das restrições de fluxos existentes.

Na Figura 2.8 são apresentados gráficos de alguns resultados obtidos, aplicando a formulação proposta por VAN ZUYLEN e WILLUMSEN (1980) na rede

hipotética da Figura 2.2 em quatro cenários, definidos a partir da variação da matriz OD semente. De modo análogo a Figura 2.7, a entropia do sistema é apresentada em função da demanda T_{AC} . No primeiro cenário, representado pela Figura 2.8, é fornecida uma matriz semente que está dentro das possíveis soluções ($T_{AC} = 20$), mas que não é a solução com maior entropia considerando a Equação 2.2. O resultado para este cenário mostra que a matriz que maximiza a função é a própria matriz semente. No segundo cenário, representado pela Figura 2.9, a matriz-semente fornecida é uma matriz proporcional à matriz semente do primeiro cenário, com todas as demandas multiplicadas por 0,80. É interessante constatar que o resultado de estimação foi igual ao do cenário anterior. No terceiro cenário, representado pela Figura 2.10, foi testada a utilização de uma matriz semente constante, com todas as demandas iguais a 10. O resultado obtido mostrou que a solução de estimação é igual à matriz estimada na primeira formulação proposta por WILLUMSEN (1978). Como todas as demandas-sementes possuem a mesma probabilidade ($t_{ij}/\sum t_{ij}$), a variação dessas demandas, na matriz a ser estimada, não interfere no termo adicionado na nova formulação, tornando a Equação 2.17 semelhante à 2.2. Observa-se, entretanto, que o valor da função, entre as Figuras 2.7 e 2.10, possui ordem de grandeza distinta. No último cenário, representado pela Figura 2.11, foi fornecida uma matriz semente que não respeita as restrições de fluxo de tráfego definidas pela Equação 2.3 e que, conseqüentemente, não respeita também a estrutura determinada na Tabela 2.3. Observa-se que a matriz estimada não respeita as proporções da matriz semente, visto que as restrições de fluxo não permitem que isto ocorra.

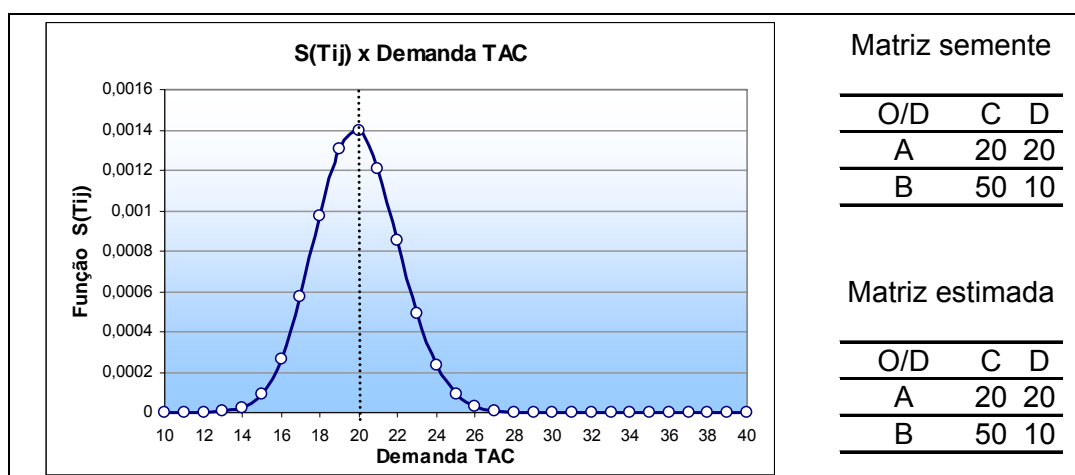


Figura 2.8: Resultado de estimação para o primeiro cenário

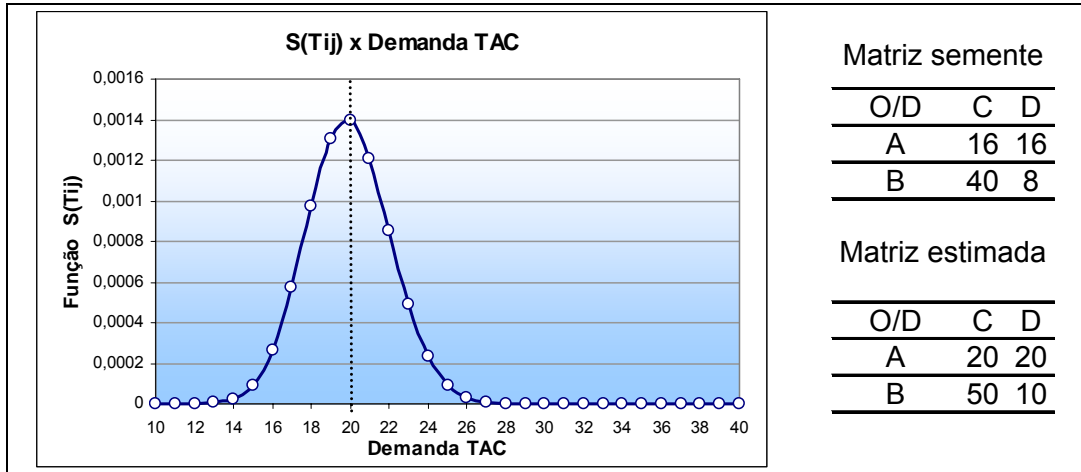


Figura 2.9: Resultado de estimação para o segundo cenário

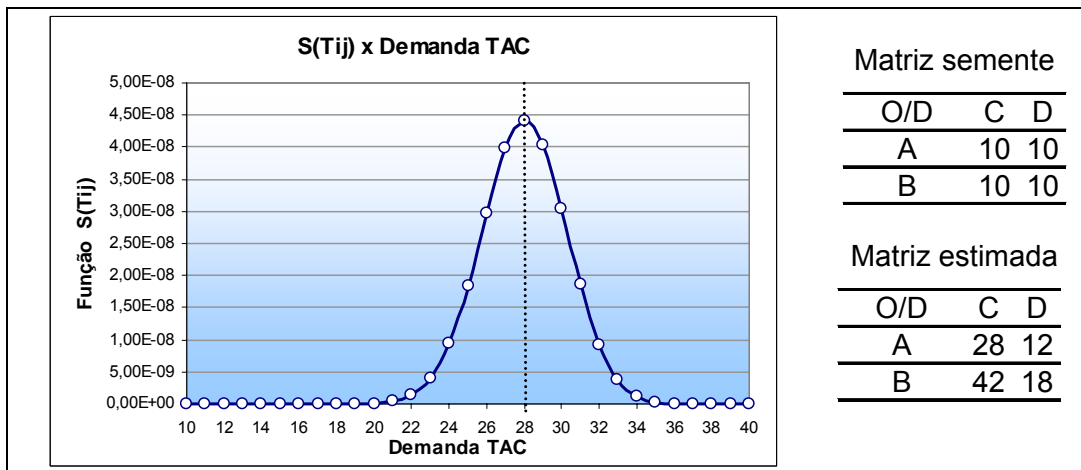


Figura 2.10: Resultado de estimação para o terceiro cenário

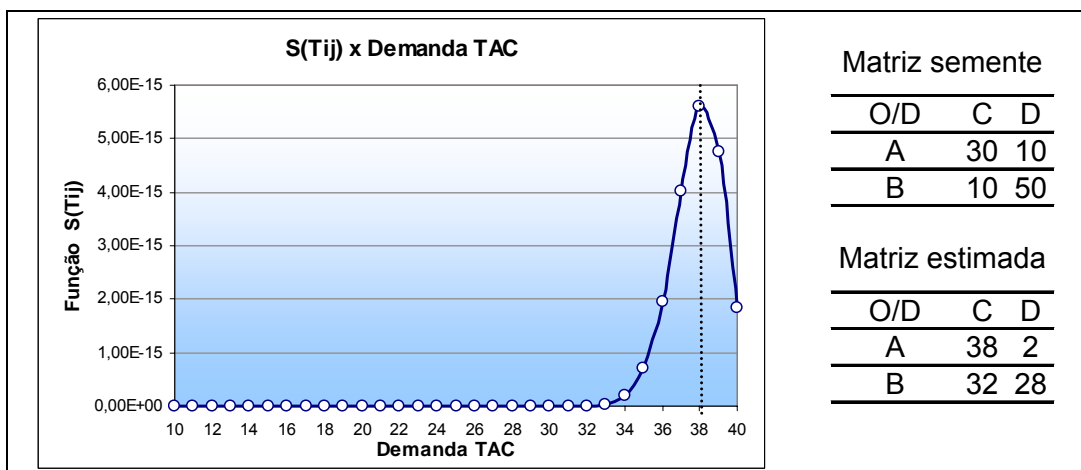


Figura 2.11: Resultado de estimação para o quarto cenário

Com o intuito de reduzir os esforços durante o processo de estimação, WILLUMSEN (1984) propôs aproximações e simplificações na Equação 2.17, substituindo-a pela Equação 2.18.

$$\text{MINIMIZAR } S(T_{ij}) = \sum_{ij} T_{ij} \left(\frac{(T_{ij} - t_{ij})^2}{2t_{ij}} \right) \quad (2.18)$$

Como mostra RAKHA *et al.* (1998a) e BERTONCINI (2007), nessa formulação é possível ainda incorporar a restrição de fluxo definida pela Equação 2.3 na Equação 2.18, aplicando o multiplicador Lagrangeano (λ_a), como mostrado na Equação 2.19.

$$\text{MINIMIZAR } S(T_{ij}) = \sum_{ij} T_{ij} \left(\frac{(T_{ij} - t_{ij})^2}{2t_{ij}} \right) + \sum_a \lambda_a \left(V_a - \sum_{ij} T_{ij} p_{ij}^a \right) \quad (2.19)$$

Até então, a maioria dos algoritmos de solução desenvolvidos eram fundamentados na premissa de que a utilização das rotas para um determinado deslocamento deveria ser definida *a priori*, independente do processo de estimação da matriz. Essa premissa limitava, portanto, a utilização dos métodos de estimação a situações de não congestionamento da rede. ROBILLARD (1975) classifica os métodos de alocação utilizados nestas formulações como proporcionais, em que a proporção de viagem (p_{ij}^a) utilizando determinada rota é independente do valor de fluxo. O exemplo mais comum de alocação utilizada é a alocação “tudo ou nada”, na qual o valor de p_{ij}^a é definido como:

$$p_{ij}^a \begin{cases} 1 & \text{se as viagens entre } i \text{ e } j \text{ usa o arco } a; \\ 0 & \text{outro caso.} \end{cases}$$

Segundo ORTÚZAR e WILLUMSEN (1994), em situações em que a existência de congestionamento influencia a escolha das rotas, a premissa apresentada é questionável, visto que a matriz OD e o processo de escolha das rotas tornam-se interdependentes. Neste caso, é sugerida a utilização de técnicas de alocação mais realistas em conjunto com o problema de estimação, em que, o valor de p_{ij}^a seja dependente do volume do link (Equação 2.19), retirando, deste modo, a linearidade da Equação 2.3, que será substituída pela Equação 2.20.

$$p_{ij}^a = p_{ij}^a(V_a) \quad (2.19)$$

$$V_a = \sum_{ij} T_{ij} \cdot p_{ij}^a(V_a) \quad (2.20)$$

Embora estudos anteriores tivessem proposto a solução do problema de estimação da matriz incorporando o conceito de equilíbrio do usuário (NGUYEN, 1977; GUR *et al.*, 1980; WILLUMSEN, 1984), foi FISK (1988) que forneceu a solução mais robusta, estendendo o modelo de VAN ZUYLEN e WILLUMSEN (1980) para o caso de redes congestionadas, introduzindo o conceito de equilíbrio do usuário como restrição. Na formulação de FISK (1988), a teoria da maximização da entropia e a alocação de equilíbrio do usuário foram combinadas em um único pacote computacional, com as rotas (alocação) e as demandas (estimação) nos pares OD sendo definidas em um processo iterativo em dois níveis, repetido até a obtenção de valores consistentes para ambos. A maioria das formulações que tratam o congestionamento no processo de estimação de matriz OD a partir de contagens volumétricas possui uma estrutura em dois níveis, como a apresentada por FISK (1988), na qual, em um nível superior, a matriz OD é estimada e, em um nível inferior, a utilização das rotas é definida em função da última matriz estimada (ABRAHAMSSOM, 1998). A seguir, são apresentadas as etapas de um processo iterativo genérico de estimação da matriz em redes congestionadas.

- 1) Alocar uma matriz-semente na rede a ser simulada e registrar as rotas utilizadas (p_{ij}^a). Fazer $n=1$;
- 2) Estimar a matriz $\{T_{ij}\}^n$ utilizando p_{ij}^a e os fluxos observados (V_a);
- 3) Alocar a matriz registrando as novas rotas p_{ij}^a
- 4) Fazer $n = n+1$ e retornar para a etapa 2 caso as mudanças em p_{ij}^a e T_{ij} sejam consideráveis. Caso contrário, encerrar processo.

YANG *et al.* (1992) redefiniram a função objetivo do nível superior considerando o método dos mínimos quadrados, mantendo no nível inferior a alocação por equilíbrio do usuário. A principal diferença em relação à formulação de FISK (1988) foi que os fluxos observados passaram a ser tratados como observações de variáveis aleatórias, incorporados na função objetivo do nível superior, não sendo mais considerados como restrições a serem respeitadas. YANG (1995) também apresentou heurísticas capazes de resolver o problema da estimação de matrizes OD em redes congestionadas, modelado sem a estrutura bi-nível.

Como dito, diversas formulações foram desenvolvidas pra estimar matrizes OD a partir de contagens volumétricas, sendo destacadas aqui apenas algumas. Apesar das diferenças entre essas formulações, ABRAHAMSSOM (1998) expõe que elas podem ser expressas de modo genérico, como apresentado a seguir, sendo β_1 e β_2 constantes e F_1 e F_2 algum indicador para a estimação da matriz OD e da estimação dos volumes respectivamente. A alocação da matriz $\{T_{ij}\}$ na rede simulada é representada pela Equação 2.23. No caso de a matriz-semente ser bastante confiável, β_1 assumirá valores superiores a β_2 , resultando em uma matriz estimada próxima da matriz-semente. Caso contrário, se os fluxos observados (V_a) forem mais precisos do que a matriz semente, β_2 assumirá valores superiores a β_1 (ABRAHAMSSOM, 1998).

$$\text{MINIMIZAR } F(T_{ij}, t_{ij}, V'_a, V_a) = \beta_1 F_1(T_{ij}, t_{ij}) + \beta_2 F_2(V'_a, V_a) \quad (2.21)$$

Sujeito a:

$$V'_a, T_{ij} \geq 0 \quad (2.22)$$

$$V'_a = \text{alocação}(T_{ij}) \quad (2.23)$$

Em áreas urbanas congestionadas, torna-se também relevante estudar as variações da demanda ao longo do tempo, de modo a identificar segmentos sobrecarregados temporariamente, alterações nos atrasos e nas escolhas de rotas, assim como programar intervenções operacionais para reduzir os impactos desses problemas. Uma forma de considerar as variações temporais da demanda veicular é estimar matrizes OD para diferentes períodos do dia, considerados como “fatias de tempo”. Como proposto inicialmente por WILLUMSEN (1984), uma viagem pode ser alocada a uma fatia de tempo se ela adentrar a área de estudo durante o intervalo considerado. Com base em observações dos fluxos de tráfego registradas em diferentes intervalos, pode-se então estimar matrizes OD dinâmicas, ou seja, que variam ao longo do tempo (“*time-dependent*”).

O problema da estimação de matrizes OD dinâmicas vem sendo estudado, combinando enfoques teóricos e práticos desde meados da década de 90 (HELLINGA, 1994; ASHOK, 1996; LIN, 2006), com pesquisas motivadas principalmente pela disponibilidade, cada vez maior, da coleta de dados de fluxos de tráfego em tempo real, assim como pelo forte interesse dos países desenvolvidos em otimizar a gerência da oferta viária por meio da operação de sistemas ITS. TSEKERIS e

STATHOPOULOS (2003) e KIM e LEE (2005) buscaram avaliar a eficiência e a robustez de diferentes algoritmos de estimação de matrizes dinâmicas quando aplicados a redes viárias urbanas de grande porte.

Uma outra linha de pesquisa que vem atraindo a atenção nos últimos anos, motivada pela evolução nas rotinas operacionais de sistemas ITS, busca promover melhorias na qualidade das matrizes estimadas com dados em tempo real, a partir da incorporação no modelo de estimação das informações de rotas utilizadas e tempos gastos, obtidas por meio de recursos de identificação automática de veículos. Nesta linha de pesquisa, pode-se destacar os trabalhos de DIXON e RILETT (2002 e 2005) e VANAJAKSHI e RILETT (2006).

2.2.3 Implementações Computacionais

Buscando disseminar a utilização do método de estimação de matrizes OD a partir de dados de fluxo de tráfego, alguns modelos foram implementados computacionalmente em pacotes de modelagem da demanda por transportes. Dentre eles, vale citar o modelo desenvolvido por NIELSEN (1993), implementado no *software* TransCAD (CALIPER, 2002), que permite a solução do problema em dois níveis, a partir de diferentes técnicas determinísticas e estocásticas de alocação por equilíbrio, considerando, porém, apenas os fluxos observados ao longo da rota assumida como ótima em cada par OD. Embora, posteriormente, NIELSEN (1998) tenha reformulado seu algoritmo de solução de modo a considerar os fluxos em várias rotas, este ainda não foi implementado nas novas versões do TransCAD.

Outra implementação computacional incluída nesta revisão foi implantada no *software* QueensOD e também considera o comportamento estocástico da variável fluxo de tráfego e a interdependência entre a estimação da matriz OD e o processo de escolha das rotas em cada par OD. A dissertação de PARAMAHANSAN (1999) descreve, em detalhes, a formulação matemática e o algoritmo de solução do QueensOD. A vantagem dessa solução é que a definição das rotas pode ser realizada em conjunto com o *software* de microsimulação do tráfego INTEGRATION (M. VAN AERDE & ASSOC., 2002b), possibilitando o cálculo das impedâncias a partir da modelagem microscópica dos atrasos nas interseções e dos tempos de viagem nos *links*. Neste ponto, vale mencionar ainda a implantação do método de estimação proposto por WILLUMSEN (1984), batizado de ME2, no *software* SATURN (VAN

VLIET e HALL, 1998), que também simula impedâncias em redes congestionadas, só que de forma mesoscópica.

TransCAD

O modelo desenvolvido por NIELSEN (1993) foi implementado, pela primeira vez, na versão 2.0 do TransCAD, como uma rotina independente, utilizando os modelos de alocação existentes no próprio aplicativo, sendo, posteriormente, incorporado definitivamente em sua versão 3.0. Segundo NIELSEN (1998), poucas alterações foram realizadas pelos desenvolvedores do pacote computacional TransCAD no seu modelo desde sua implantação. Até a versão 4.5, disponível para uso na Universidade Federal do Ceará, essa constatação ainda é válida.

NIELSEN (1993) denominou o seu modelo de estimação de matrizes OD como *Single Path Matrix Estimation Method* (SPME), visto que ele estima cada demanda da matriz OD em função da minimização da diferença média entre o volume observado e o volume estimado ao longo de cada caminho mínimo de cada par OD. O SPME foi desenvolvido para atualizar uma matriz OD antiga de uma região da cidade de Copenhague, na Dinamarca, em uma rede com diversas alternativas de rotas com freqüentes atrasos e formação de filas (rede com congestionamento) e com os dados de volume apresentando inconsistência (NIELSEN, 1993).

No SPME, diferente das formulações desenvolvidas a partir das linhas de pesquisa iniciadas por ROBILLARD (1975) e WILLUMSEN (1978), nenhuma consideração sobre o padrão de deslocamento é proposto buscando diminuir o universo de solução da matriz OD, ou seja, o problema da estimação busca exclusivamente determinar uma matriz OD que quando alocada na rede se aproxime ao máximo dos dados de fluxo observados. De acordo com a classificação proposta por ABRAHAMSSOM (1998), o SPME está dentro do grupo das formulações que utilizam técnicas de inferência estatística. Diante deste contexto, o SPME é recomendado, conforme concebido, para situações em que se pretende atualizar uma matriz OD (matriz-semente), a partir de dados de fluxos de tráfego atuais e precisos (NIELSEN, 1998).

O processo de estimação do SPME inicia-se, portanto, a partir da alocação de uma matriz OD semente na rede. Mesmo em situações nas quais uma matriz-semente não esteja disponível, deve ser fornecida uma matriz com valores constantes. Na utilização em conjunto com o TransCAD, diferentes técnicas de alocação podem ser

utilizadas pelo SPME, incluindo: equilíbrio do usuário, equilíbrio estocástico, otimização do sistema, restrição de capacidade, incremental e tudo-ou-nada (CALIPER, 2002). Após a alocação da matriz, registram-se os valores de fluxos estimados (V_a). Obviamente que, no caso de uma matriz-semente constante, esta primeira iteração não apresentará valores satisfatórios para os fluxos estimados. Também é registrado o caminho mínimo (r) entre cada par OD. Em seguida, calcula-se, a partir equação 2.24, o valor de demanda esperado de cada par OD ($T_{(E)ija}$), em cada arco (a) pertencente ao caminho mínimo que possua dados de fluxo observado (V_a). Após a obtenção de todos os $T_{(E)ija}$, calcula-se T_{ij} em função da equação 2.25 (média aritmética) ou 2.26 (média harmônica). Se os dados de fluxo de tráfego seguirem uma distribuição normal ou de *Poisson*, a média aritmética pode ser utilizada, caso contrário recomenda-se a utilização da média harmônica (NIELSEN, 1998). Em seguida, o critério de convergência, que pode ser o número de iterações ou a diferença entre as matrizes estimadas, é conferido, determinando-se o encerramento ou não do processo. No caso negativo, substitui-se a matriz OD semente pela última matriz OD estimada e inicia-se o processo novamente.

$$T_{(E)ija} = \frac{V_a}{V_a'} \cdot t_{ij} \quad (2.24)$$

$$T_{ij} = \frac{\sum_a T_{(E)ija}}{N_r}, \forall a \in r \quad (2.25)$$

$$T_{ij} = \frac{N_r}{\sum_a \frac{1}{T_{(E)ija}}} \quad (2.26)$$

A seguir, é apresentada uma rede hipotética (Figura 2.12), adaptada de NIELSEN (1998), utilizada para melhor ilustrar o processo de estimação implementado no TransCAD. Nesta rede, os nós 1 e 2 são origens e o nó 5 destino. A tabela ao lado representa a matriz OD semente, com $T_{15} = 300$ e $T_{25} = 360$. Para simplificação, considere que as rotas são fixas e que 2/3 da demanda T_{25} utiliza a rota 2-3-5, que, neste caso, será o caminho mínimo, e que o restante (1/3 da demanda) utiliza a rota 2-4-5.

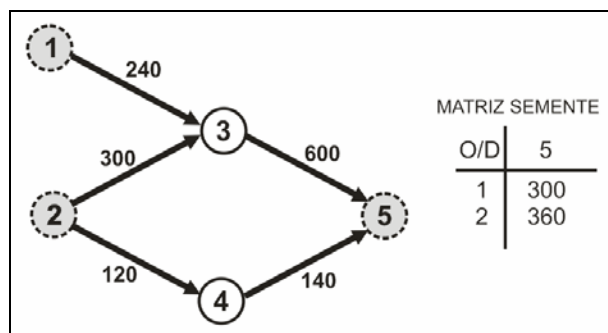


Figura 2.12: Rede hipotética utilizada para descrever o processo de estimação do TransCAD, adaptada de NIELSEN (1998)

Na primeira iteração, a alocação da matriz semente replicará os volumes representados na Figura 2.13, obtendo a partir da Equação 2.24 e 2.25 os seguintes valores para as demandas (Tabela 2.5).

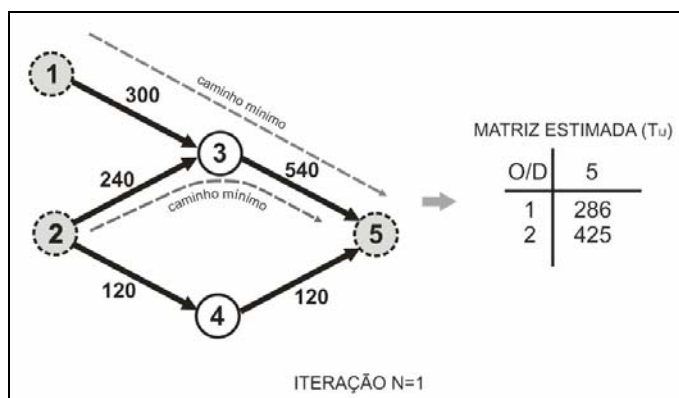


Figura 2.13: Estimação dos fluxos de tráfego e matriz OD após a primeira iteração

Cálculo do $T_{(E)jia}$	Cálculo do T_{ij}
$T_{(E)15(1-3)} = \frac{240}{300} \cdot 300 = 240$	$T_{15} = \frac{240 + 333,33}{2} = 286,67$
$T_{(E)15(3-5)} = \frac{600}{540} \cdot 300 = 333,33$	
$T_{(E)25(2-3)} = \frac{300}{240} \cdot 360 = 450$	$T_{25} = \frac{450 + 400}{2} = 425$
$T_{(E)25(3-5)} = \frac{600}{540} \cdot 360 = 400$	

Repetindo o processo descrito, e substituindo a matriz-semente pela matriz estimada na iteração anterior, obtêm-se os resultados apresentados nas Tabelas 2.6 e 2.7, referentes à segunda e terceira iteração respectivamente. Na Figura 2.14 são apresentados os fluxos de tráfego e a matriz estimada para essas duas iterações.

Tabela 2.6: Cálculo das demandas para a rede hipotética na segunda iteração

Cálculo do $T_{(E)ija}$	Cálculo do T_{ij}
$T_{(E)15(1-3)} = \frac{240}{286} \cdot 286 = 240$	$T_{15} = \frac{240 + 302,29}{2} = 270,8$
$T_{(E)15(3-5)} = \frac{600}{569} \cdot 286 = 302,29$	
$T_{(E)25(2-3)} = \frac{300}{283} \cdot 425 = 450,5$	$T_{25} = \frac{450,5 + 448}{2} = 449,3$
$T_{(E)25(3-5)} = \frac{600}{569} \cdot 425 = 448$	

Tabela 2.7: Cálculo das demandas para a rede hipotética na terceira iteração

Cálculo do $T_{(E)ija}$	Cálculo do T_{ij}
$T_{(E)15(1-3)} = \frac{240}{271} \cdot 271 = 240$	$T_{15} = \frac{240 + 285}{2} = 262,6$
$T_{(E)15(3-5)} = \frac{600}{570} \cdot 271 = 285$	
$T_{(E)25(2-3)} = \frac{300}{299} \cdot 449 = 450,5$	$T_{25} = \frac{450,5 + 472,6}{2} = 461,6$
$T_{(E)25(3-5)} = \frac{600}{570} \cdot 449 = 472,6$	

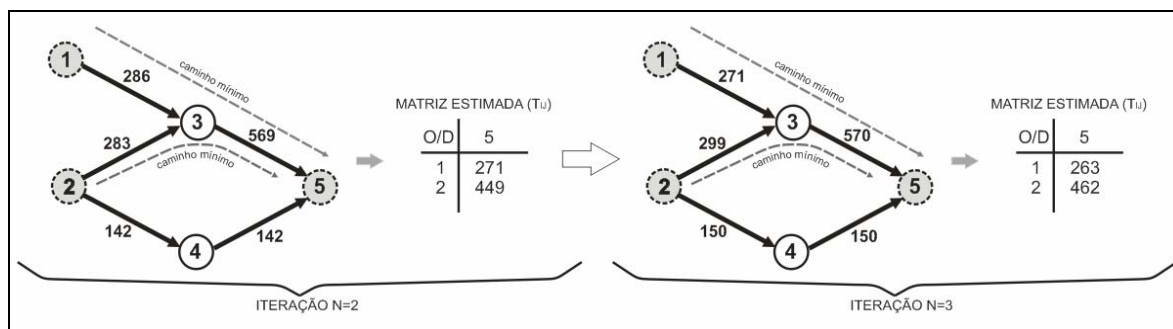


Figura 2.14: Estimação de fluxos de tráfego e matriz OD após segunda e terceira iteração

Na décima iteração, as demandas T_{15} e T_{25} mudam apenas na primeira casa decimal, apresentando, respectivamente, os seguintes valores: 253,4 e 474,8. A Figura 2.15 apresenta os fluxos modelados para a matriz estimada, que, para esta

rede simplificada, foram bastante satisfatórios. O maior erro absoluto aconteceu no arco 3-5 ($e=30$) e o maior erro relativo aconteceu no arco 2-4 ($e =31,7\%$), ao se comparar os fluxos observados e estimados.

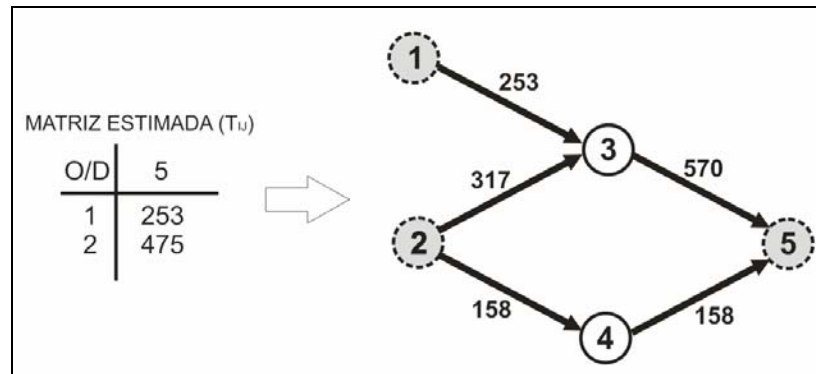


Figura 2.15: Estimação dos fluxos de tráfego e matriz OD após a décima iteração

Apesar de o SPME considerar apenas a rota que representa o caminho mínimo, no momento da estimação, percebe-se que ele estima fluxos nas demais rotas também dependendo da técnica de alocação utilizada. Entretanto, surge uma dúvida não esclarecida na formulação proposta por NIELSEN (1993). Na utilização de técnicas baseadas no equilíbrio do usuário, em que mais de uma rota pode ser utilizada apresentando a mesma impedância (redes congestionadas), qual será a rota considerada como “caminho mínimo”? Na prática, a formulação de NIELSEN (1993) foi estudada em alguns trabalhos e vários pesquisadores têm afirmado que obtiveram bons resultados com seu uso (BERTONCINI, 2007).

QuensOD

A formulação implementada no QuensOD (M. VAN AERDE & ASSOC., 2002a) se baseou na linha de pesquisa iniciada por WILLUMSEN (1978). O objetivo foi criar um pacote computacional que desse suporte ao microssimulador INTEGRATION (M. VAN AERDE & ASSOC., 2002b), fornecendo uma matriz OD capaz de ser alocada no microssimulador. Para tanto, os dois pacotes computacionais compartilham a mesma estrutura de dados e tipo de arquivos de entrada, não sendo necessário, entretanto, possuir o INTEGRATION para utilizar o QuensOD na estimação de matrizes OD (M. VAN AERDE & ASSOC., 2002a).

O programa QuensOD é executado a partir da entrada de uma série de informações relativas às características geométricas, de tráfego e de controle da rede

a ser simulada, sendo essas informações codificadas em arquivos em formato texto. Outros arquivos, tais como o arquivo de volumes observados, o arquivo da matriz OD semente e o arquivo dos movimentos de conversão nas interseções são específicos ao ambiente de codificação do QuensOD. A Figura 2.16, adaptada de DEMARCHI *et al.* (2004) mostra como a estrutura dos arquivos de entrada utilizados pelo QueensOD e INTEGRATION é compartilhada. Para mais detalhes ver M. VAN AERDE & ASSOC. (2002a) e M. VAN AERDE & ASSOC. (2002b).

Como no TransCAD, a formulação implementada no QueensOD também considera o comportamento estocástico da variável fluxo de tráfego e a interdependência entre a estimação da matriz OD e o processo de escolha das rotas. Como pode ser observado na Figura 2.16, o fornecimento de uma matriz-semente é opcional. Caso não seja fornecida uma matriz-semente, o próprio algoritmo gerará uma matriz-semente interna com todas as demandas possíveis constantes (M. VAN AERDE & ASSOC., 2002a).

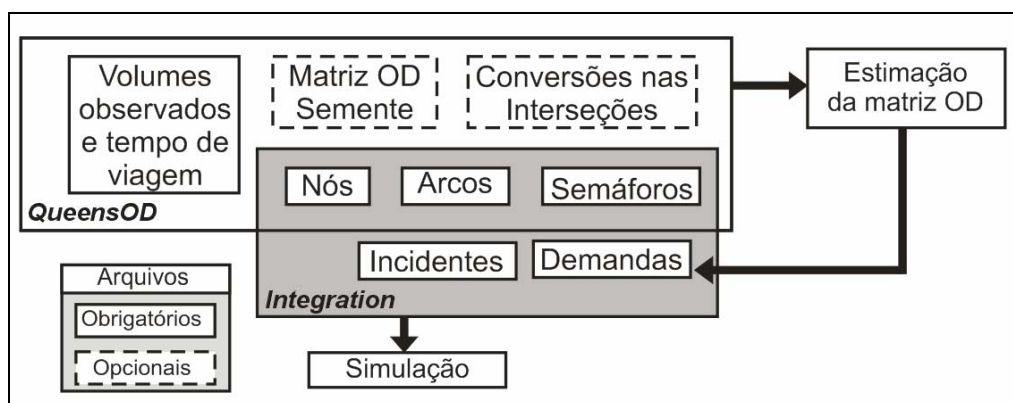


Figura 2.16: Estrutura de arquivos compartilhada entre o QueensOD e o Integration, adaptada de DEMARCHI *et al.* (2004)

A seguir, na Equação 2.27, é apresentada a função a ser maximizada pelo QueensOD. Percebe-se que esta equação é composta por duas parcelas, conforme o modelo genérico apresentado por ABRAHAMSSOM (1998). A primeira parcela representa a verossimilhança entre a matriz estimada e a matriz-semente, enquanto que a segunda representa o erro entre os fluxos observados e estimados (VAN AERDE *et al.*, 2003).

$$\text{MAXIMIZAR } S_{ij} = T \ln \frac{T}{t} - T - \sum_{ij} \left(T_{ij} \ln \left(\frac{T_{ij}}{t_{ij}} \right) - T_{ij} \right) + \sum_{ij} \lambda_{ij} \cdot 2 \left(\sum_a (V_a p_{ij}^a) - \left(\sum_a p_{ij}^a \left(\sum_{ij} T_{ij} p_{ij}^a \right) \right) \right) \quad (2.27)$$

A alocação utilizada pelo QueensOD é uma alocação macroscópica e se inicia com a alocação da matriz-semente. Esta primeira alocação é do tipo tudo-ou-nada, em que é definida a árvore de caminhos mínimos para todos os pares OD da matriz-semente (M. VAN AERDE & ASSOC., 2002a). A definição desses caminhos é feita em função dos tempos de viagem, fornecidos em conjunto com os dados de fluxos observados. É necessário informar para o QueensOD tanto o tempo de viagem de fluxo livre, que considera a velocidade de fluxo livre do arco, como o tempo de viagem observado, que considera a velocidade média do tráfego no arco durante a coleta dos dados de fluxo. Após essa alocação, uma matriz OD é estimada em função da Equação 2.27, iniciando-se em seguida uma segunda iteração no processo de estimação.

Essa nova matriz é alocada novamente na rede, entretanto os dados de tempos de viagem observados não são os mesmos (M. VAN AERDE & ASSOC., 2002a). Os arcos que tiverem, na iteração anterior, fluxo estimado superior ao observado terão os tempos de viagem observados aumentados com o intuito de torná-los menos atrativos e, de modo contrário, os arcos que tiverem fluxo estimado inferior ao observado terão seu tempo de viagem observado reduzido. No manual do QueensOD não é detalhado como esse tempo de viagem é modificado. Acredita-se que essa alteração esteja relacionada com o tempo de viagem de fluxo livre, entretanto não se sabe qual função de impedância é utilizada para representar essa relação. Nessa nova alocação tudo-ou-nada, uma nova árvore de caminhos mínimos é definida; entretanto a demanda que utilizará essa nova árvore de caminhos, ao invés da definida na primeira alocação, é alocada aos poucos, em passos definidos pelo usuário. A cada passo, uma proporção da demanda é alocada nessa nova árvore de caminhos, sendo estimada uma matriz OD e registrado o erro entre os fluxos estimados e observados. O processo é encerrado quando o erro registrado é superior ao registrado no passo anterior. Com a matriz OD estimada na iteração anterior, a alocação é refeita, obtendo-se uma nova árvore de caminhos a partir de uma nova configuração de tempos de viagem. Todo esse processo é repetido até a obtenção de resultados satisfatórios, ou até que seja atingido algum outro critério pré-estabelecido. A Figura 2.17 apresenta um fluxograma que ilustra o processo aqui descrito.

Observa-se que nesse fluxograma não é mostrado como o processo de estimação chega ao seu fim. O processo é encerrado quando o número de iterações pré-definidas pelo usuário é atingido ou quando as diferenças do erro em duas iterações consecutivas entre as demandas-semente e as demandas estimadas e entre

os fluxos observados e os fluxos estimados assumem valores mínimos pré-definidos pelo usuário. O QueensOD permite estabelecer três formas para calcular o erro, como apresentado nas Equações 2.29 (erro quadrático), 2.30 (erro relativo) e 2.31 (erro poissoniano).

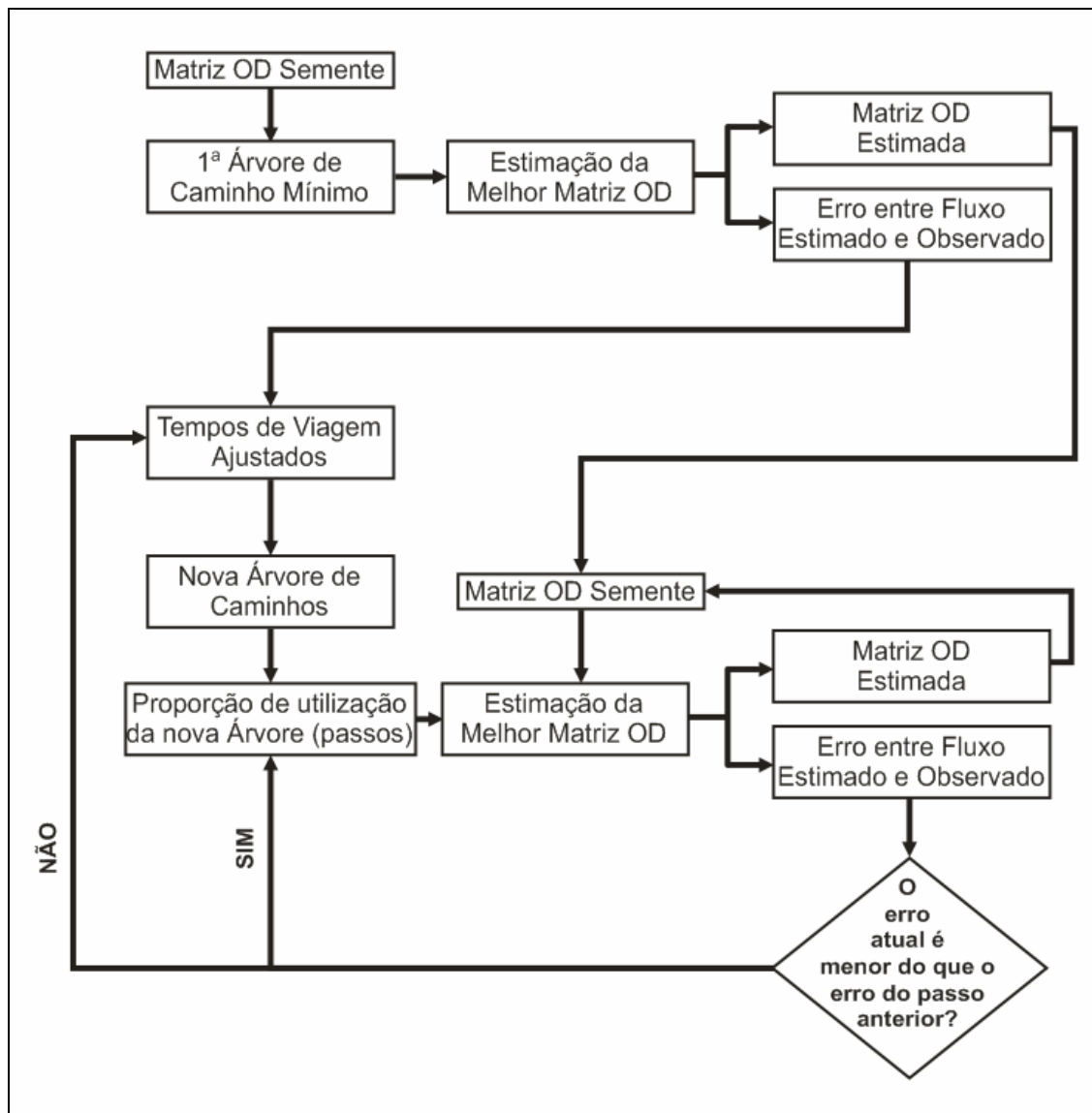


Figura 2.17: Fluxograma de estimação da matriz OD pelo QueensOD, Fonte: M. VAN AERDE & ASSOC. (2002a)

$$E = \sum_i (X_i^{\text{obs}} - X_i^{\text{est}})^2 \quad (2.29)$$

$$E = \sum_i \left(\frac{X_i^{\text{obs}} - X_i^{\text{est}}}{X_i^{\text{obs}}} \right)^2 \quad (2.30)$$

$$E = \sum_i \left(\frac{X_i^{\text{obs}} - X_i^{\text{est}}}{\sqrt{X_i^{\text{obs}}}} \right)^2 \quad (2.31)$$

Em que,

X_i^{obs} : Demanda observada (semente) no par OD i ou fluxo observado para o arco i ;

X_i^{est} : Demanda estimada para o par OD i ou fluxo estimado para o arco i .

RAKHA *et al.* (1998b) utilizaram o QueensOD para estimar a matriz OD de uma rede simulada no INTEGRATION da cidade de Salt Lake (EUA) e avaliaram o comportamento do modelo em relação a alguns aspectos como: tipo de erro utilizado (Equações 2.29 a 2.31) e quantidade máxima de caminhos entre os pares OD (um ou dois caminhos). A avaliação realizada por RAKHA *et al.* contemplou a qualidade dos resultados (matriz e fluxo estimado) e a velocidade de processamento do pacote computacional. Os resultados foram bastante interessantes, mostrando que o uso de uma matriz semente, obtida em outro momento, permite a estimação precisa das demandas e, conseqüentemente, dos fluxos de tráfego. As conclusões obtidas em relação à velocidade de processamento, analisada no respectivo trabalho, não são tão relevantes atualmente, visto que a capacidade dos computadores aumentou consideravelmente.

No âmbito nacional, destaca-se o trabalho de DERMACHI *et al.* (2004) que obtiveram resultados satisfatórios na utilização do QueensOD para estimar a matriz OD da região central da cidade de Maringá. Nesse trabalho, a matriz OD foi estimada sem o uso de uma matriz OD semente, e a eficiência do modelo foi avaliada apenas em relação à replicação dos fluxos observados. Os melhores resultados obtidos por DERMACHI *et al.* (2004) foram utilizando o erro relativo (Equação 2.30) para as demandas e o erro absoluto (Equação 2.29) para os fluxos. A rede simulada, neste caso, é bastante semelhante à rede da cidade de Fortaleza, com uma densidade semaforica e possibilidade de caminhos similares, além da presença de congestionamento.

CAPÍTULO 3

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DO ESTUDO DE CASO

Este capítulo é iniciado com uma breve descrição da região monitorada pelo CTAFOR, seguida de uma caracterização da área do estudo de caso quanto ao uso do solo e aos aspectos funcionais, físicos e operacionais de suas vias, que permitiu conhecer as particularidades dessa região, facilitando o processo de simulação da rede. É apresentada ainda uma caracterização das demandas de deslocamento obtida para uma determinada hora de pico. A obtenção dessas demandas foi necessária, principalmente, para confrontar com os resultados de estimação, como apresentado no capítulo seguinte.

3.1 CONTROLE DE TRÁFEGO EM ÁREA DE FORTALEZA (CTAFOR)

Seguindo a tendência das grandes cidades no mundo, a Prefeitura Municipal de Fortaleza (PMF), em setembro de 2000, implantou um sistema de transporte inteligente, através de um moderno sistema de controle e operação do tráfego urbano, com o objetivo de propiciar uma sobrevida ao sistema viário da área mais adensada e saturada do seu município (LOUREIRO *et al.*, 2002). Esse sistema, batizado de CTAFOR (Controle de Tráfego em Área de Fortaleza), opera através de outros três subsistemas, denominados a seguir: o subsistema de monitoração remota do tráfego por circuito fechado de televisão (CFTV), o subsistema de painéis de mensagens variáveis (PMV) e o subsistema de controle centralizado de semáforos (SCOOT).

Atualmente, o subsistema CFTV realiza o monitoramento remoto do tráfego a partir de 34 câmeras instaladas nas principais interseções da cidade. O objetivo desse sistema é permitir um diagnóstico imediato das condições do tráfego nas vias de grande volume, através da identificação, em tempo real, de acidentes e outras ocorrências de trânsito, possibilitando uma redução das perturbações e congestionamentos gerados por esses eventuais incidentes. Já o subsistema de PMV conta com 20 painéis e tem como finalidade estabelecer um contato direto com os usuários do trânsito, alertando-os sobre as condições do tráfego. O terceiro subsistema, e por sua vez o mais importante, é responsável por realizar a otimização semaforica de 215 interseções (42% da rede semaforica), a partir de um sistema

adaptativo em tempo real, que busca reduzir os atrasos e número de paradas nas aproximações das interseções controladas (LOUREIRO *et al.*, 2002), tendo como base o pacote computacional SCOOT (*Split, Cycle and Offset Optimization Technique*) (TRL, 2000).

Este tipo de controle requer informações constantes sobre o comportamento do tráfego. No caso do SCOOT, essas informações são obtidas por laços de detecção veicular localizados nas aproximações das interseções controladas. A partir desses laços, que contabilizam as demandas veiculares, é possível fazer toda a modelagem do tráfego, otimizando, a cada instante, os melhores tempos de ciclo, proporção de verde e defasagens. A Figura 3.1 apresenta, de forma resumida, o funcionamento do sistema SCOOT. A operação é iniciada com a detecção da demanda veicular, a partir da malha de detectores localizados nas aproximações das interseções controladas. Essa informação é, em seguida, enviada à central de controle através de Linhas Privadas (LP) de comunicação, onde é então processada pelo modelo de tráfego do sistema SCOOT. Após processar os dados coletados nas vias, o SCOOT modela o comportamento do tráfego e define a operação ótima para o cruzamento, enviando-a ao controlador do semáforo que executa a ação.



Figura 3.1: Esquema de funcionamento do sistema SCOOT

A seguir, na Figura 3.2, é apresentado o mapa do município de Fortaleza com a disposição espacial das interseções e o tipo de controle semaforico. A denominação

“semáforos centralizados”, mostrada nesta figura, foi designada às interseções que são controladas pela central de tráfego (CTAFOR), com tecnologia que permite a operação em tempo real. Já a denominação “semáforos convencionais” foi designada às interseções controladas por equipamentos que não se comunicam com a central de tráfego e que só permitem a operação em tempo fixo.

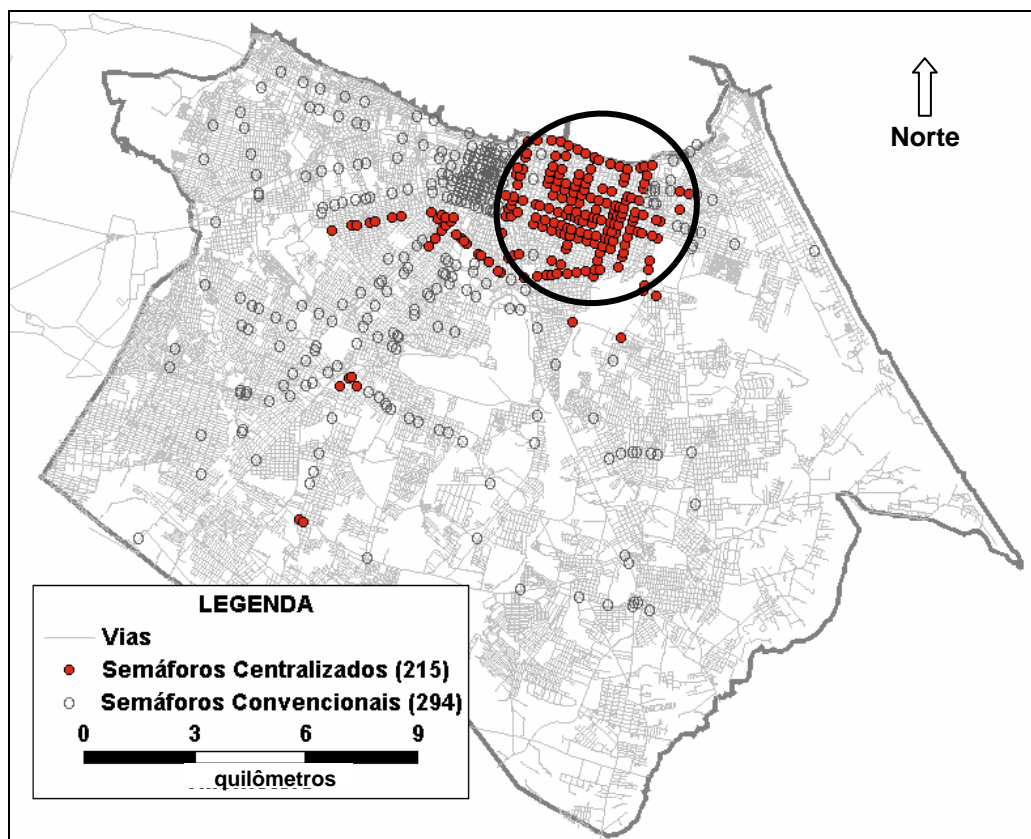


Figura 3.2: Tipos de controle das interseções semaforizadas do município de Fortaleza

A seguir, a Figura 3.3 traz, com mais detalhes, a região destacada na Figura 3.2. Nesta figura, é apresentada a malha de detectores utilizada pelo subsistema de controle centralizado de semáforos para realizar a otimização em tempo real da programação semafórica. No total, essa otimização é feita com o auxílio de aproximadamente 630 laços detectores, que registram durante todo o dia os fluxos veiculares em determinada via. Analisando a Figura 3.3 percebe-se que essa malha de detectores cobre uma quantidade considerável das principais vias da região, podendo ser bastante útil no processo de estimação sintética de matrizes OD. Além desse aspecto espacial, destaca-se ainda outra contribuição importante desse sistema, que é o aspecto temporal. Todas essas informações de fluxo de tráfego

detectadas são armazenadas em um banco de dados dinâmico, permitindo a estimação de matrizes OD para diversos horários e dias distintos.

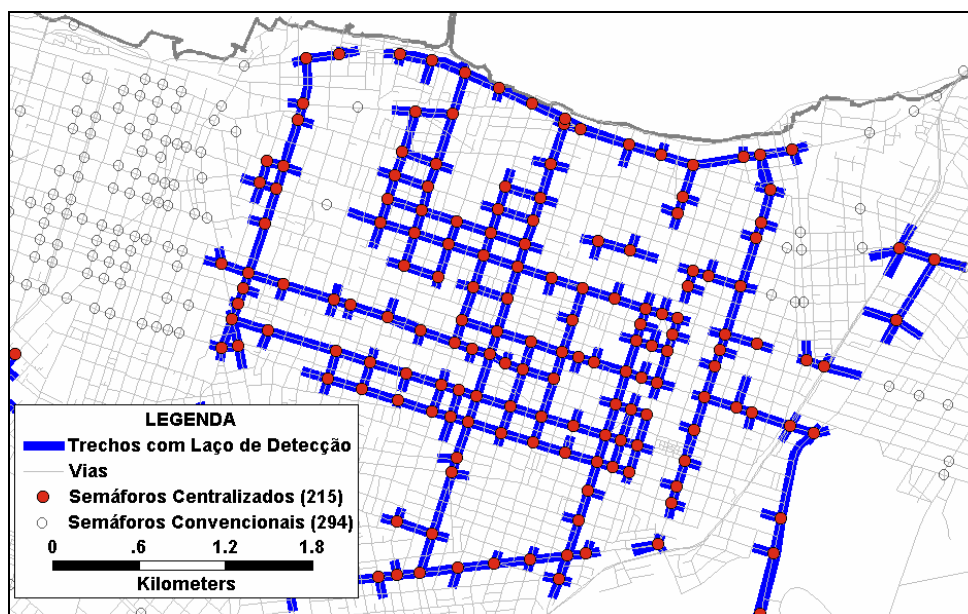


Figura 3.3: Malha de detectores

Como destacado no capítulo introdutório, apesar de o sistema implantando no CTAFOR ser eficaz no controle operacional do tráfego urbano, ele não soluciona os problemas de congestionamento definitivamente. Prova disto é que na região, destacada na Figura 3.2, que concentra a maioria dos deslocamentos realizados com o transporte motorizado individual e que se caracteriza por ser a região mais adensada da cidade, com intenso uso do solo residencial e comercial, a qualidade do tráfego vem se reduzindo constantemente com os anos. Nesta região, as vias vêm apresentando, segundo LOUREIRO *et al.* (2004), elevada saturação e velocidades médias operacionais, durante o pico, variando em torno de 20 km/h. Avaliando o cenário atual da qualidade do tráfego dessa região, conjuntamente com o cenário de tendência de crescimento da frota de veículos (ver Figura 3.4) e considerando, ainda, as características de expansão restrita da oferta viária, percebe-se a necessidade do planejamento de ações, visando a garantia da manutenção da qualidade do tráfego em níveis satisfatórios mínimos (PAULA *et al.*, 2005).

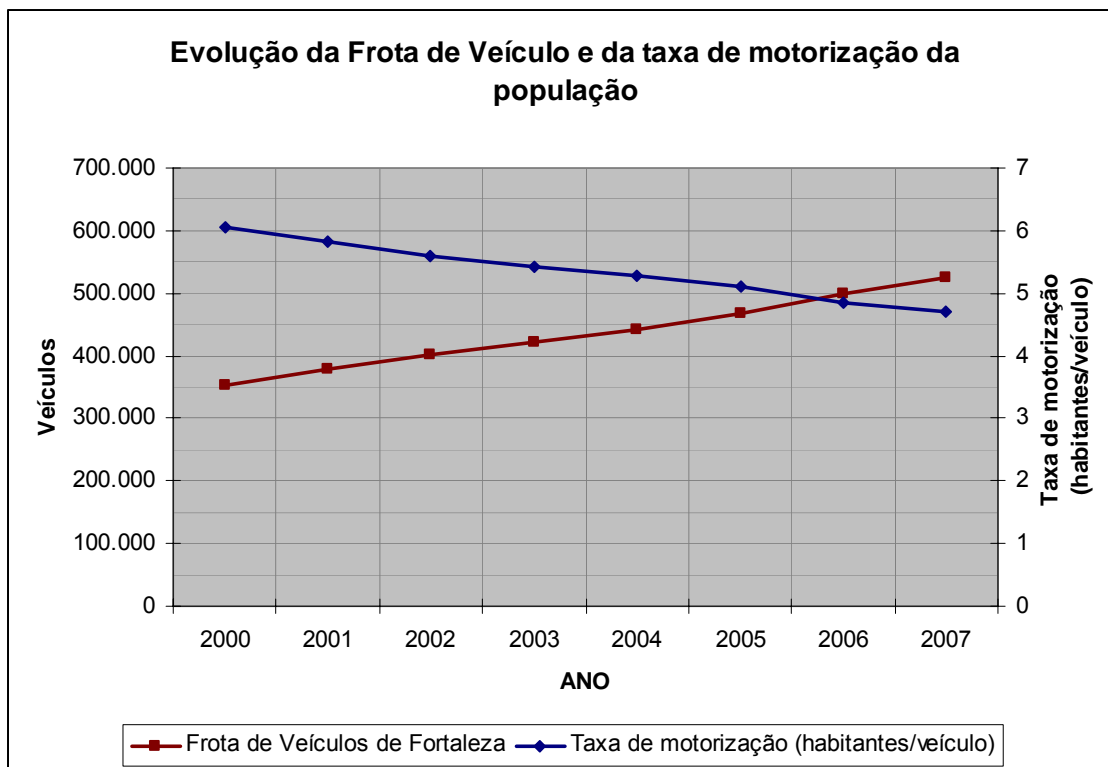


Figura 3.4: Evolução da frota de veículos e da taxa de motorização de Fortaleza. Fonte: Detran (2007)

3.2 DELIMITAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO DO CASO

A aplicação do método sintético de estimação de matrizes OD em uma área de estudo de caso teve como finalidade gerar uma maior compreensão e experiência na utilização desse método, tirando conclusões e recomendações para estimações posteriores de matrizes OD para toda a região controlada em tempo real. Deste modo, após a realização da revisão bibliográfica, a primeira etapa, buscando alcançar os objetivos estabelecidos, foi delimitar uma área de estudo que fosse representativa da região controlada em tempo real destacada na Figura 3.2.

Foi definida, portanto, uma rede que apresentasse congestionamento e com um tipo de uso do solo e operação do tráfego característicos de toda a área controlada em tempo real. O conceito de congestionamento aqui empregado refere-se à utilização de múltiplas rotas para o deslocamento entre pontos distintos da rede, ou seja, refere-se à existência de rotas que competem entre si com custos de viagem semelhantes. Como visto na revisão bibliográfica, nesta situação, a escolha das rotas e a estimação de matrizes OD são interdependentes, sendo necessária a realização de uma alocação do tráfego mais precisa.

Diante do exposto, foi determinada uma área de estudo, com cerca de 0,5 km², limitada pela Rua Pereira Filgueiras (ao norte), Avenida Santos Dumont (ao sul), Rua Carlos Vasconcelos (ao oeste) e Avenida Barão de Studart (ao leste). Esta área compreende uma rede com oito vias, totalizando 15 interseções, sendo oito interseções semaforizadas e sete não-semaforizadas, como apresentado nas Figuras 3.5 e 3.6. Nos próximos tópicos, são apresentadas algumas informações importantes dessa área de estudo quanto ao uso do solo e às características físicas e operacionais das vias.

3.3 CARACTERIZAÇÃO QUANTO AO USO DO SOLO

Buscando conhecer a área de estudo com mais detalhes, foi realizado o levantamento do uso do solo, identificando se esse uso era residencial, comercial, escolar ou do tipo institucional. Essas informações foram úteis tanto na etapa de codificação da rede, como na análise crítica dos resultados de demanda obtidos na matriz OD observada e estimada. Na Figura 3.7 é apresentado o levantamento do uso do solo realizado.

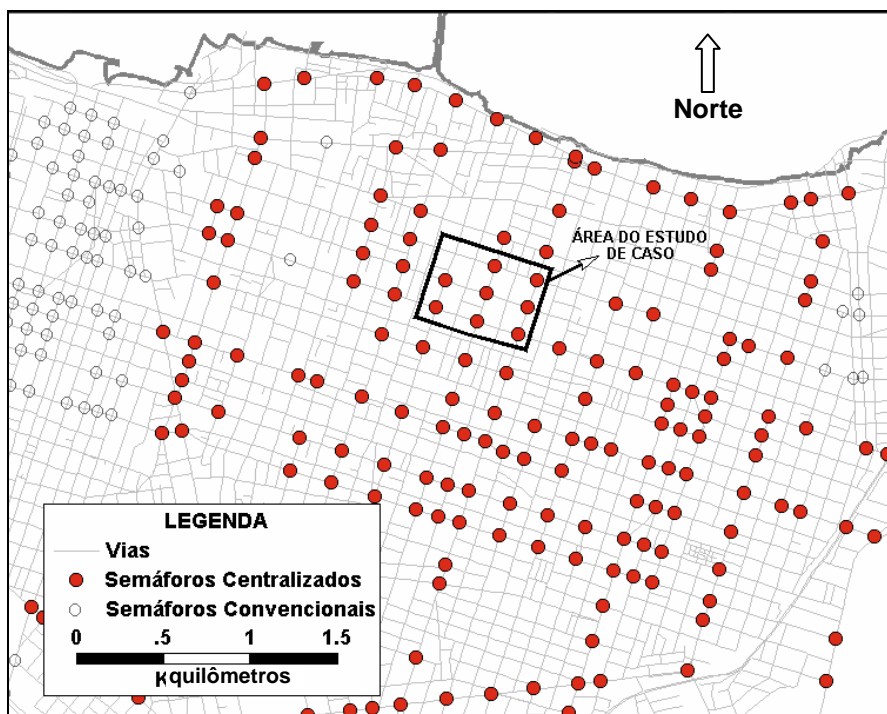


Figura 3.5: Região com controle em tempo real, destacando a área do estudo de caso

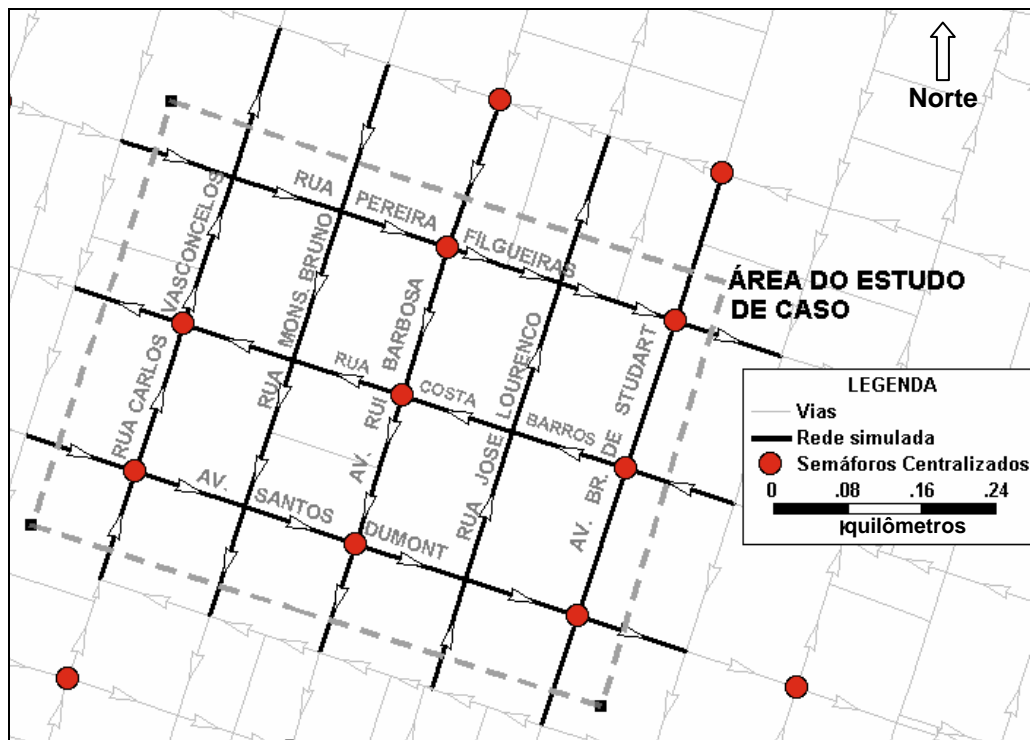


Figura 3.6: Área do estudo de caso

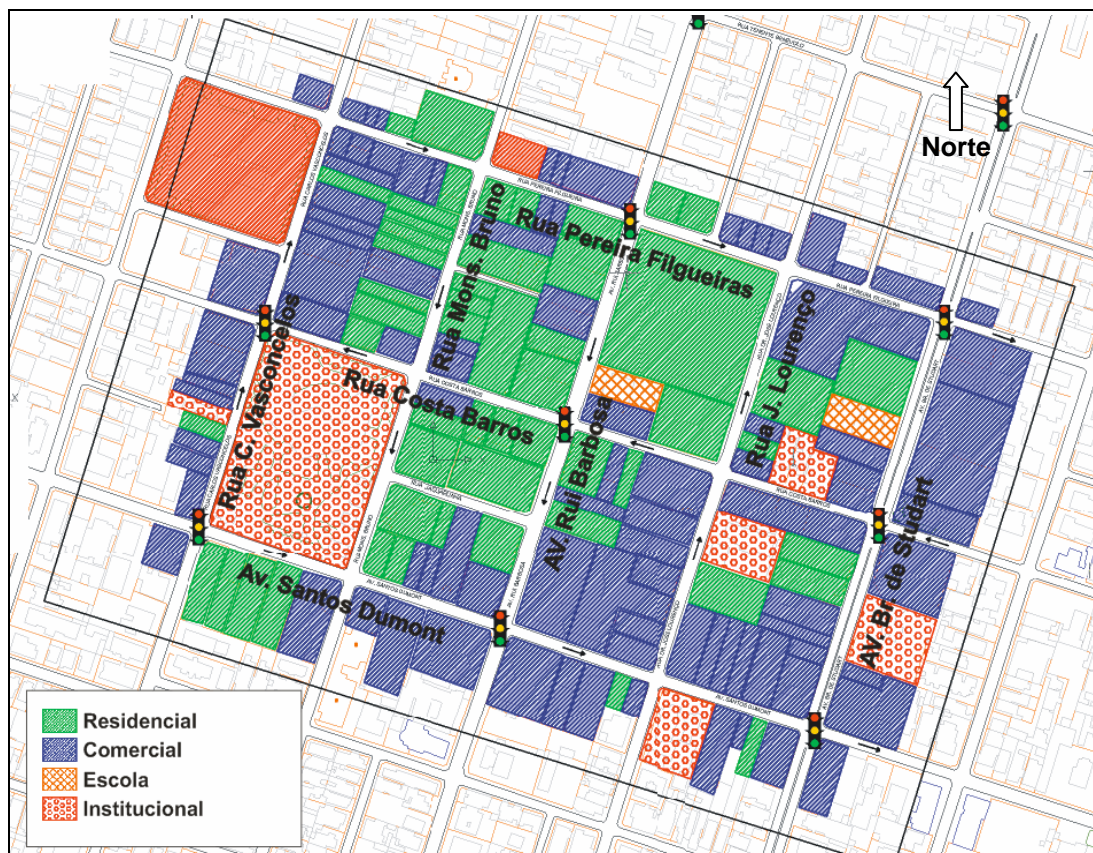


Figura 3.7: Uso do solo da área do estudo de caso

A região é bastante adensada, não apresentando vazios urbanos, e com uso do solo misto. Analisando a Figura 3.7, percebem-se vias com uso do solo predominantemente comercial, como no caso da Avenida Barão de Studart, Avenida Santos Dumont e Rua Carlos Vasconcelos; vias com uso do solo predominantemente residencial, como no caso da Rua Monsenhor Bruno e Rui Barbosa; e vias com uso do solo misto, como no caso da Rua Pereira Filgueiras, Rua Costa Barros e Rua Dr. José Lourenço.

3.4 CARACTERIZAÇÃO QUANTO AOS ASPECTOS FUNCIONAIS E FÍSICOS DAS VIAS

A rede da região em que está inserida a área de estudo é uma rede reticulada, em formato de “grelha”, com vias estreitas e sem uma hierarquia bem definida. Segundo PAULA *et al.* (2005), os deslocamentos realizados nesta região, que deveriam ocorrer no conjunto das vias arteriais, acabam por utilizar vias coletoras e locais. Dessa forma, o sistema viário básico, utilizado pelo tráfego de passagem, é composto por um conjunto misto de vias arteriais, coletoras e até mesmo locais. Na Tabela 3.1 é apresentada a classificação dessas vias de acordo com a Lei de Uso e Ocupação do Solo (PMF, 1996) de Fortaleza. Observa-se que a classificação, segundo a legislação vigente, não condiz com a funcionalidade real da via. As ruas Carlos Vasconcelos e Pereira Filgueiras, por exemplo, perderam a funcionalidade de vias locais e já absorvem grande parte do tráfego de passagem. Do mesmo modo, a Rua Dr. José Lourenço, classificada como uma via local, já possui funcionalidade de uma via coletora.

Tabela 3.1: Classificações das vias da área do estudo de caso

Vias	Classificação segundo a legislação (PMF, 2006)
Avenida Barão de Studart	Arterial I
Avenida Santos Dumont	Arterial I
Rua Costa Barros	Arterial II
Avenida Rui Barbosa	Arterial II
Rua Carlos Vasconcelos	Local
Rua Pereira Filgueiras	Local
Rua Dr. José Lourenço	Local
Rua Monsenhor Bruno	Local

Com exceção da Avenida Barão de Studart, que é uma via de sentido duplo, com duas faixas por sentido segregadas por canteiro central, as demais vias da rede são de sentido único, sendo a Avenida Rui Barbosa com três faixas e as outras com duas faixas de tráfego. Nas vias com sentido leste/oeste e oeste/leste (Avenida Santos Dumont, Rua Costa Barros e Rua Pereira Filgueiras) e na Avenida Barão de Studart o estacionamento longitudinal em ambos os lados é proibido, sendo a demanda por estacionamento atendida por estacionamentos recuados ou por estacionamentos internos das edificações. Nas demais vias, o estacionamento longitudinal é permitido em pelo menos um dos lados, em alguns casos controlados por zona azul.

3.5 CARACTERIZAÇÃO QUANTO AOS ASPECTOS OPERACIONAIS DAS VIAS

Os semáforos da área de estudo (oito, no total) são todos centralizados, operando com dois estágios de movimento veicular, com ciclo operacional nos picos de tráfego variando em torno de 104 segundos. As interseções não-semaforizadas são controladas por sinalização de parada obrigatória (placa “PARE”), sendo sempre as vias com sentido leste/oeste e oeste/leste as vias preferenciais das interseções.

Nas Figuras 3.8 e 3.9, são apresentados, respectivamente, os dados de fluxo do tráfego e de grau de saturação nas aproximações das interseções semaforizadas para o pico da tarde (17h15 a 18h15). Os valores médios apresentados nestas figuras são referentes aos dias de terça, quarta e quinta-feira dos meses de abril, maio e junho de 2006. Esses dados foram úteis ainda no processo de estimação das matrizes, como descrito no Capítulo 4, onde será apresentada também a metodologia utilizada para o tratamento desses dados. Observa-se, analisando a Figura 3.8, um maior fluxo de tráfego, superior a 1.200 veíc./hora, e um maior grau de saturação, em torno de 90%, nas Avenidas Santos Dumont e Rui Barbosa. De modo geral, analisando o grau de saturação, para este horário, percebe-se que a capacidade das aproximações semaforizadas ainda não foi totalmente atingida.

O tráfego entre o transporte coletivo e o transporte individual é compartilhado e os pontos de parada de ônibus não possuem baias, sendo a faixa direita de circulação interrompida durante a operação de embarque/desembarque. O tráfego de transporte coletivo ocorre predominantemente nas vias de sentido oeste/leste e leste/oeste, evidenciando a importância desses corredores no deslocamento pendular da população usuária do transporte coletivo. Observou-se a operação de seis linhas

de transporte coletivo na Avenida Santos Dumont, sete na Rua Costa Barros, duas na Rua Pereira Filgueiras, três na Avenida Barão de Studart (sentido norte/sul) e duas na Avenida Barão de Studart (sentido sul/norte).

3.6 CARACTERIZAÇÃO DOS DESLOCAMENTOS NA ÁREA DO ESTUDO DE CASO

Definida a área de estudo e feita sua caracterização quanto às variáveis apresentadas no tópico anterior, a etapa seguinte consistiu em planejar e executar a coleta da matriz OD dessa área a partir de algum método tradicional. Como exposto na introdução deste capítulo, a finalidade da obtenção dessa matriz (matriz OD observada) foi permitir, em uma etapa posterior, uma avaliação dos resultados de estimação obtidos (matriz OD estimada).

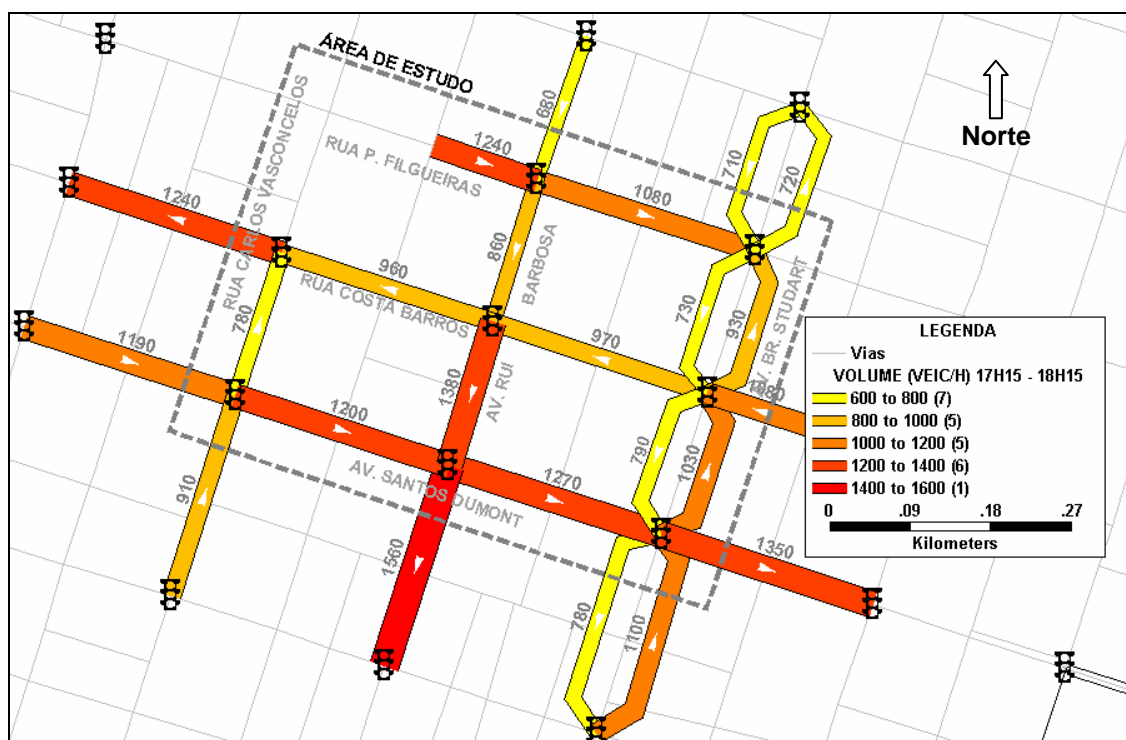


Figura 3.8: Dados de fluxo de tráfego da área do estudo de caso para o pico da tarde

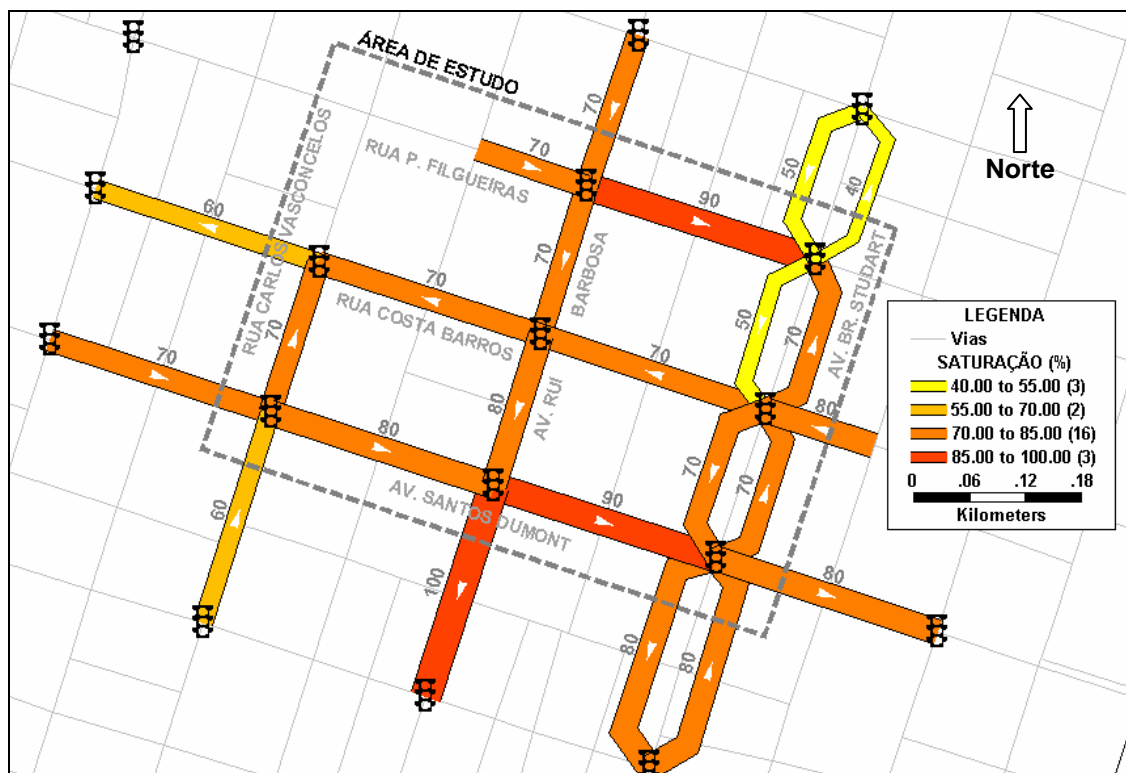


Figura 3.9: Dados de grau de saturação da área do estudo de caso para o pico da tarde

O método tradicional escolhido para obter as demandas de deslocamentos na área de estudo foi o método de leitura de placa, que, entre os métodos tradicionais, é o que despense menos recursos e menos tempo na compilação dos dados. Apesar de os demais métodos permitirem associar as demandas com dados socioeconômicos e com os motivos de viagem, para o estudo em questão, essas informações não eram necessárias visto que os métodos sintéticos de estimação de matrizes OD, aqui estudados, definem apenas a magnitude das demandas, não fazendo qualquer associação com outras informações.

3.6.1 Zoneamento da Área de Estudo

Em uma etapa anterior ao planejamento da pesquisa, foi necessário realizar o zoneamento da área de estudo, identificando os pontos de origem e destino, já que os postos de observação da pesquisa de placa devem ser definidos em função desse zoneamento. Por ser uma região relativamente pequena, optou-se por desagregar a rede ao máximo. Deste modo, cada ponto de entrada foi classificado como zona de origem e cada ponto de saída como destino e cada quadra foi classificada como zona

de origem e destino. A Figura 3.10 apresenta o zoneamento proposto, destacando os centróides dessas zonas. Observa-se que, em todas as quadras, existe um centróide, ligado à rede a partir de um conector. Após esse zoneamento, foram identificadas oito zonas de entrada na rede, classificadas como origem, oito zonas de saída classificadas como destinos, e 25 zonas representando as quadras, classificadas, ao mesmo tempo, como origem e destino, totalizando, no final, 33 origens e 33 destinos.

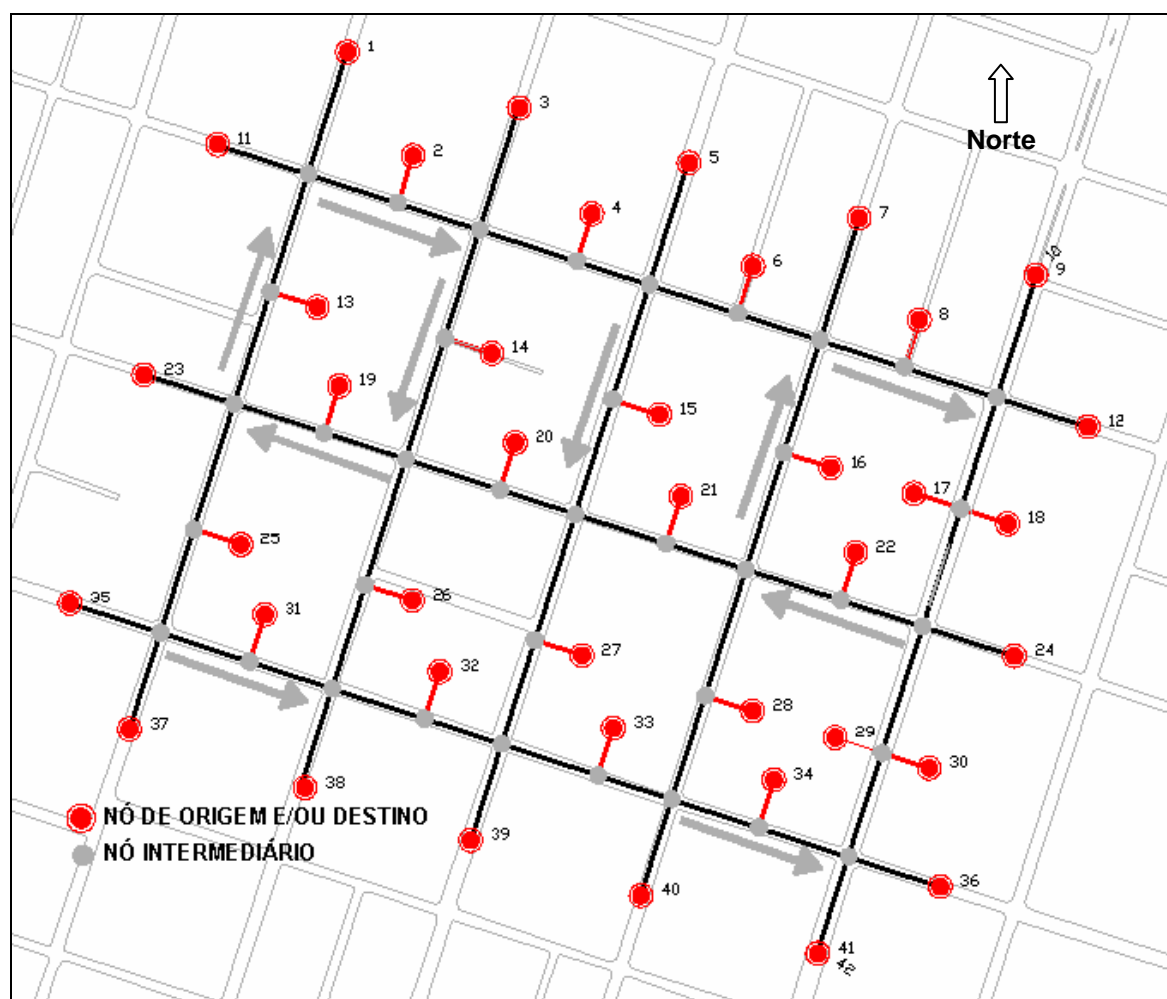


Figura 3.10: Zoneamento da área do estudo de caso

3.6.2 Pesquisa de Leitura de Placa

A pesquisa de placa foi realizada no dia 07/06/06 (quarta-feira), durante o pico da tarde, entre 17h00 e 18h30, sendo dividido em seis intervalos de 15 minutos. Para análise posterior da estimação da matriz OD, foi considerada somente a faixa horária entre 17h15 e 18h15, sendo excluído o primeiro e último intervalo. Esses intervalos desconsiderados foram incluídos na pesquisa de placa apenas para

identificar possíveis viagens que tiveram início ou término fora do período estabelecido para análise.

Devido à dificuldade em se registrar manualmente todas as placas dos veículos que trafegam por um posto de observação, o registro das placas foi feito de forma amostral. Foram registrados apenas os automóveis de cor prata, que, como identificado anteriormente no banco de dados do Detran-CE, representa cerca de 20% de toda a população. É importante destacar ainda que o registro das placas foi feito de forma parcial, sendo anotados apenas os dígitos numéricos da placa. A placa HWJ-2658, por exemplo, foi registrada apenas como 2658.

Para a realização desta pesquisa, foram definidos 15 postos de observação, referentes às 15 interseções existentes na área de estudo. Esses postos de observação foram divididos em três grupos, o primeiro compreendendo as cinco interseções da Rua Pereira Filgueiras, o segundo compreendendo as cinco interseções da Rua Costa Barros e o último compreendendo as cinco interseções da Avenida Santos Dumont. Deste modo, para cobrir os 15 postos de observação definidos foram necessários 28 pesquisadores, além de três pesquisadores reservas, distribuídos conforme apresentado na Figura 3.11 a seguir. Para cada grupo estabelecido, foi designado ainda um supervisor.

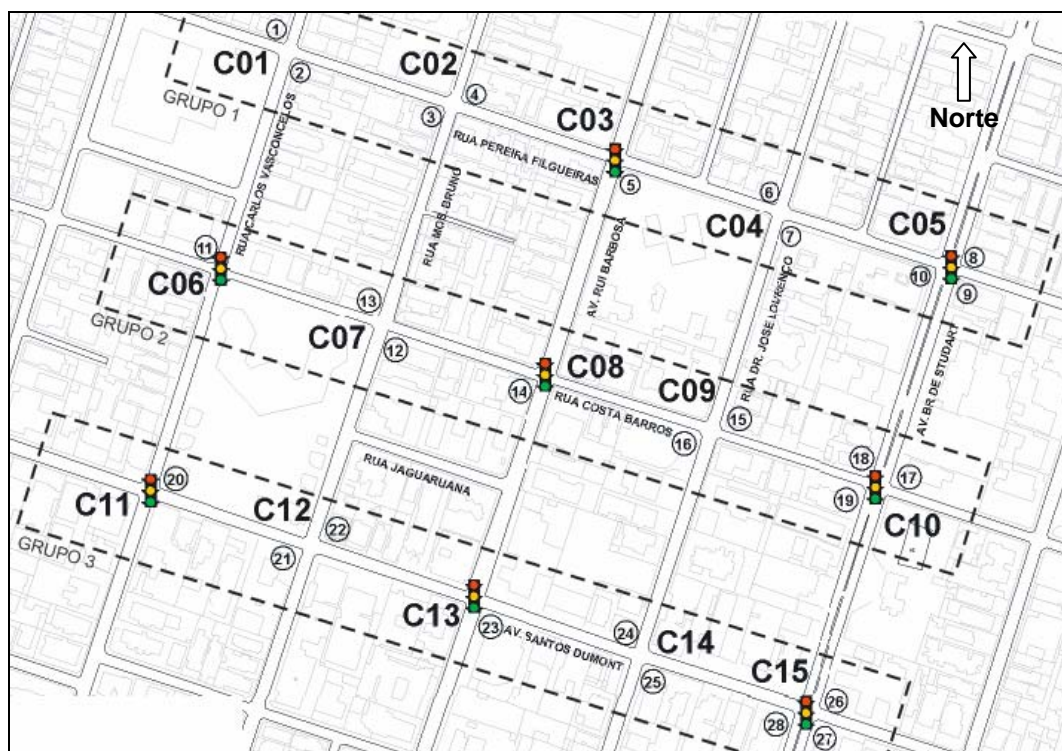


Figura 3.11: Distribuição dos pesquisadores nos postos de observação

Cada pesquisador ficou responsável por registrar as placas que realizassem determinados movimentos de conversão no posto de observação. No caso do posto de observação 01 (C01), por exemplo, o pesquisador 01 ficou responsável pelos movimentos A e B e o pesquisador 02 pelos movimentos C e D (ver Figura 3.12). Deste modo, cada registro de placa foi identificado em conjunto com o movimento realizado.

Após a execução da pesquisa de placa os dados foram tabulados. Nessa tabulação, cada registro de placa foi identificado com o respectivo posto de observação, com o intervalo de coleta e com o movimento de conversão realizado na interseção. É importante destacar que antes da etapa de compilação, foi necessário realizar um tratamento desses dados, buscando identificar possíveis erros ocorridos durante a pesquisa.

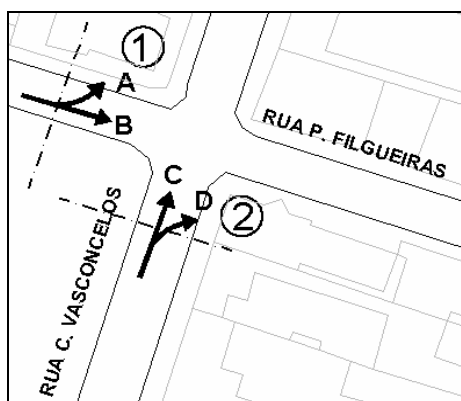


Figura 3.12: Movimento de conversão do posto de observação 01

Neste tratamento, foram identificados três tipos de erro. O primeiro tipo de erro referiu-se aos registros incompletos. Em algumas situações, quando mais de um veículo de cor prata cruzava o posto de observação, não era possível registrar todos os dígitos das placas. Nesta situação, foi recomendando aos pesquisadores que anotassem a quantidade máxima de dígitos e registrassem com “X” os dígitos não identificados (ex: 265x, 32xx, x788). Para cada placa incompleta, foram verificados os registros dos postos de observações à jusante e à montante. A Figura 3.13 ilustra essa situação. Neste caso, no posto de observação 02, foi feito o registro incompleto “34xx”. Confrontando esse registro com os registros feitos nos outros postos de observação, percebe-se que o registro refere-se à placa “3452”.

O segundo tipo de erro referiu-se ao registro incorreto que acontece quando algum dígito da placa foi anotado erroneamente. Esse tipo de erro é muito mais difícil de ser identificado do que o erro anterior, sendo na maioria das vezes descoberto ao acaso. Buscando minimizar a quantidade desses erros foram identificadas as placas com apenas um registro e que possuíam origem e destino pouco provável (Ex: origem no nó 22 e destino no nó 21 - ver Figura 3.10). Neste caso, para cada placa identificada, os registros dos postos de observações à jusante e à montante eram confrontados, para confirmar ou não o erro. A Figura 3.14 ilustra esta situação, neste caso a placa “3453” foi registrada no posto de observação 02 de forma errada, quando o registro correto, provavelmente, deveria ser “3452”.

O terceiro tipo de erro referiu-se aos registros repetidos, que ocorrem quando duas placas distintas apresentam a parte numérica idêntica. Inicialmente, este tipo de erro também foi descoberto ao acaso; entretanto na fase de compilação dos dados, como apresentado a seguir, foi possível minimizá-lo. No total dos seis intervalos de pesquisa, foram feitos 9.413 registros, originados de 3.516 placas (viagens) diferentes; desses registros, 352 foram incompletos (3,7%), 94 foram errados (1,0%) e 658 placas (18,7%) com pelo menos uma repetição.

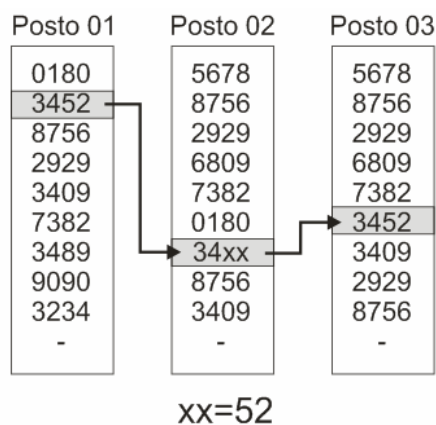


Figura 3.13: Tratamento do registro incompleto

Posto 01	Posto 02	Posto 03
0180	5678	5678
3452	8756	8756
8756	2929	2929
2929	6809	6809
3409	7382	7382
7382	0180	3452
3489	3453	3409
9090	8756	2929
3234	3409	8756
-	-	-

REGISTRO ERRADO: ~~3453~~
REGISTRO CORRIGIDO: 3452

Figura 3.14: Tratamento do registro errado

Após a tabulação dos dados, estes foram compilados com o auxílio de uma macro desenvolvida no ambiente VBA (*Visual Basic for Application*), compondo o caminho realizado pelos veículos e determinando conseqüentemente as suas origens e destinos. Na Figura 3.15 é apresentado um exemplo da obtenção da origem e destino de uma determinada placa. Neste caso, o veículo cruzou o posto de observação 01 no segundo intervalo, com origem no nó 11 e destino no nó 2; em seguida, esse mesmo veículo cruza, no mesmo intervalo, o ponto de observação 02, com origem no nó 2 e destino no nó 4, não sendo mais identificado em nenhum outro ponto de observação. Compilando os registros desse veículo, determina-se a sua origem e destino que são, respectivamente, nó 11 e 4 e atribui-se essa viagem ao segundo intervalo.

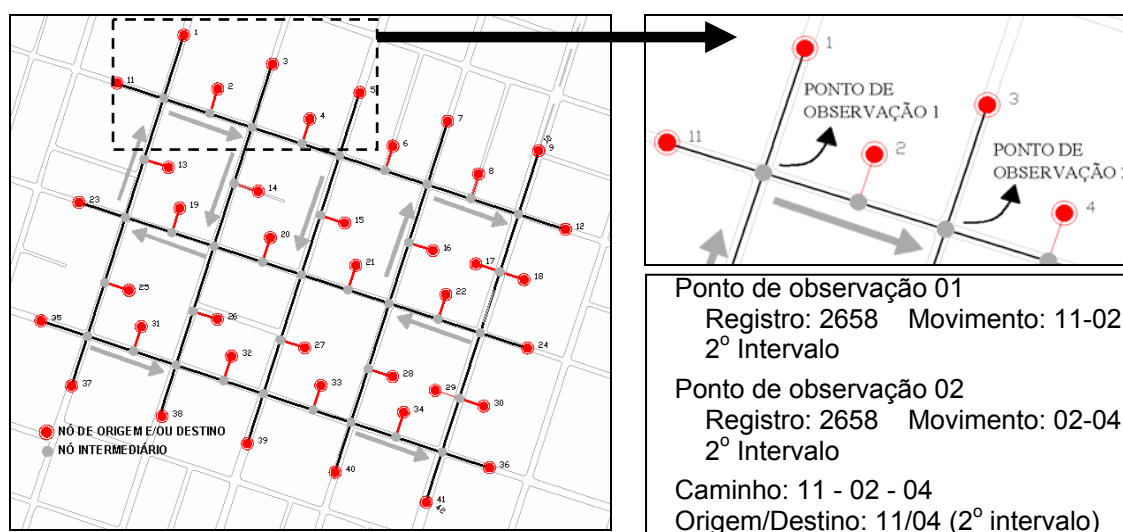


Figura 3.15: Composição dos caminhos das placas registradas

Nas situações em que os registros eram repetidos e não era possível compor os caminhos, a compilação dos dados acusava um erro. Nesta situação, a macro interrompia a composição do caminho desses registros, identificando-os como repetidos. Em uma etapa posterior cada registro repetido foi tratado manualmente. Do total de placas repetidas, 350 placas tiveram seus caminhos compostos manualmente.

Um outro problema identificado e tratado na etapa de compilação dos dados, referiu-se a placas identificadas em dois intervalos distintos. Neste caso, as viagens se iniciavam em um intervalo e encerravam no intervalo seguinte, como exposto no exemplo apresentado a seguir. Considere uma placa identificada às 17h14 em um posto de observação (intervalo 2) e em seguida às 17h16 (intervalo 3) em outro posto de observação. Nesta situação, as viagens eram atribuídas ao intervalo que teve mais registros, ou seja, se uma determinada placa foi identificada em três postos de observação no segundo intervalo e apenas em um posto de pesquisa no terceiro horário a viagem era atribuída ao segundo intervalo.

Após o tratamento e compilação dos dados, foram obtidas as matrizes OD amostrais dos seis intervalos de 15 minutos definidos anteriormente, que apresentaram demanda amostral horária variando entre 2.170 (17h15 - 17h30) e 2.670 viagens (18h00 - 18h15), como pode ser observado na Figura 3.16.

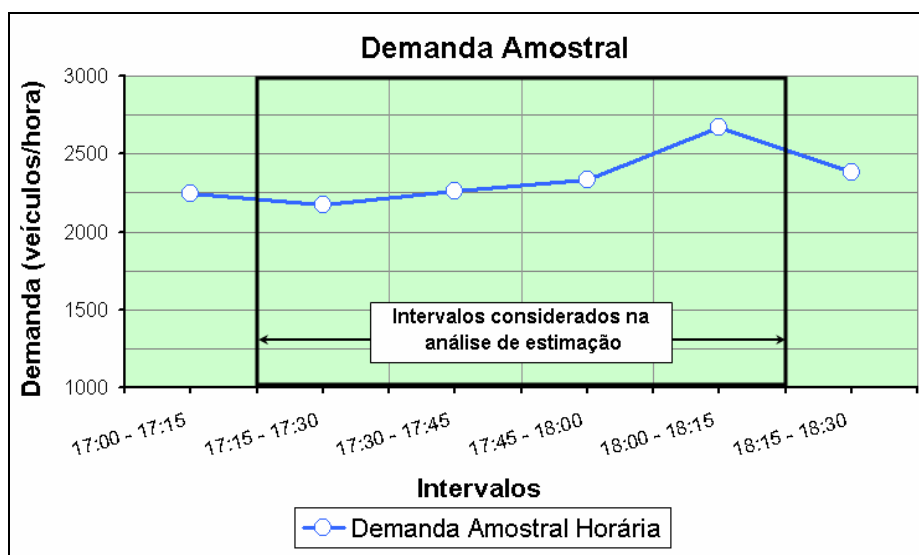


Figura 3.16: Variação da demanda horária amostral por intervalo de pesquisa

A matriz OD amostral para o período de análise (17h15 - 18h15), definido anteriormente, totalizou 2.393 viagens, representando a médias das demandas do segundo ao quinto intervalo. No Anexo I, essa matriz OD amostral pode ser visualizada. Nessa matriz, de um total de 1089 pares OD possíveis (33 origens x 33 destinos), foram observadas viagens apenas em 312 pares OD (29% do total). Essa constatação pode ser explicada a partir da Tabela 3.2 em que é apresentado um resumo com a classificação das viagens por tipo de deslocamento para essa matriz amostral. Percebe-se o predomínio do tráfego de passagem com 43% do total das viagens e poucas viagens entre as zonas internas à área de estudo, em virtude da pequena área de estudo considerada. Na Figura 3.17, é possível observar ainda as viagens originadas e destinadas de cada zona, verificando-se uma maior concentração de viagens nos pontos de entrada e saída da rede.

Tabela 3.2: Classificação das viagens por tipo de deslocamento na matriz amostral

Características das viagens	Demanda amostral
Internas à área de estudo	258 (11%)
Entrando na área de estudo	544 (23%)
Saindo da área de estudo	558 (23%)
Passando pela área de estudo	1.033 (43%)
Total	2.393

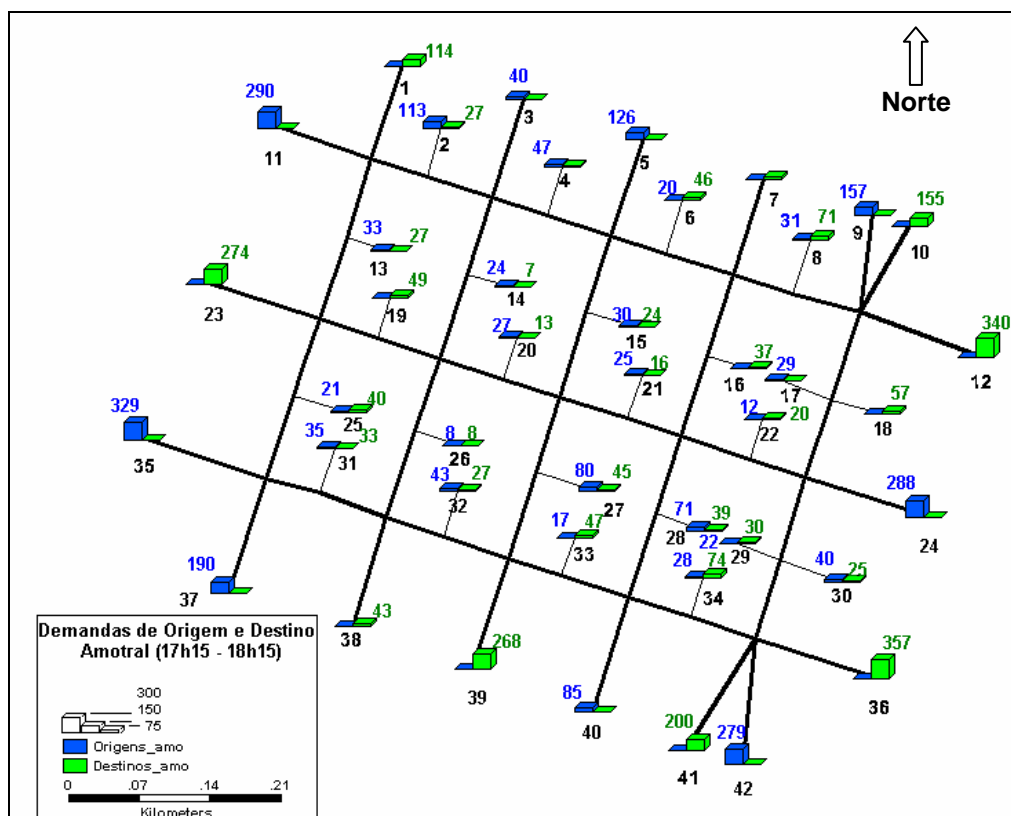


Figura 3.17: Demandas de origem e destino amostrais do período de análise (17h15 - 18h15)

Obtida a matriz OD amostral, foi realizada em seguida a expansão dessa matriz a partir do método de Furness (ORTÚZAR e WILLUMSEN, 1994), com dupla restrição (origens e destinos). Esse método consiste em determinar fatores (f) para cada origem e destino, que são utilizados para expandir o total de viagens originadas e destinadas de cada zona, como mostrado a seguir nas Equações 3.1 e 3.2. A Figura 3.18 ilustra esse processo. A partir da matriz OD amostral (Figura 3.18a) e dos fatores de expansão (f), obtém-se o total de viagens originadas (O_i) e destinadas (D_j) de cada zona (Figura 3.18b). Definidos os valores de O_i e D_j , que servirão como restrição no método de Furness, inicia-se a etapa de obtenção das demandas de viagens (T_{ij}).

$$O_i = f_i \cdot o_i \quad (3.1)$$

$$D_j = f_j \cdot d_j \quad (3.2)$$

em que,

- O_i : Total de viagens originadas na zona i na matriz expandida
- o_i : Total de viagens originadas na zona i na matriz amostral
- D_j : Total de viagens destinadas a zona j na matriz expandida
- d_j : Total de viagens destinadas a zona j na matriz amostral
- f: fator de expansão utilizado

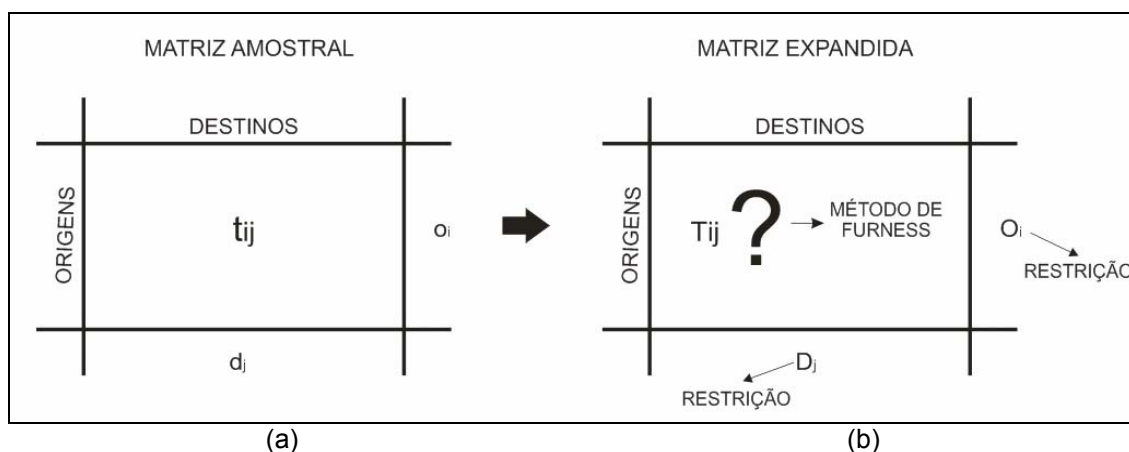


Figura 3.18: Ilustração do processo de expansão da matriz amostral

Os fatores de expansão foram definidos a partir das informações de fluxo de tráfego e dos registros realizados nos postos de observação. Quando possível, cada zona de origem e/ou destino era associada a um posto de observação e a um laço de detecção. Em seguida era calculada a proporção da quantidade de registros feita no posto de observação em relação à quantidade de veículos identificada pelo laço de detecção. Desta forma, foi possível estabelecer a proporção dos registros amostrais em relação a toda a população e, conseqüentemente, os fatores de expansão a serem utilizados. Para as zonas que não foi possível estabelecer essa relação, caso das vias que não possuíam laços de detecção (Rua Monsenhor Bruno e Rua Dr. José Lourenço), foi utilizado um fator de expansão constante igual a 4,35, que representou o valor médio dos fatores obtidos e que variou entre 5,9 e 3,7.

No final do processo de expansão, foi obtida uma matriz OD populacional, apresentada no Anexo I, com demanda total horária de 10.976 viagens. Na Tabela 3.3 é apresentado um resumo com a classificação das viagens por tipo de deslocamento para essa matriz expandida. Semelhante à matriz OD amostral, percebe-se o predomínio do tráfego de passagem e a pequena quantidade de viagens entre as zonas internas à área de estudo. Na Figura 3.18, observam-se ainda as viagens originadas e destinadas de cada zona.

Tabela 3.3: Classificação das viagens por tipo de deslocamento matriz expandida

Características das viagens	Demanda amostral
Internas à área de estudo	1113 (10%)
Entrando na área de estudo	2340 (22%)
Saindo da área de estudo	2659 (24%)
Passando pela área de estudo	4864 (44%)
Total	10976

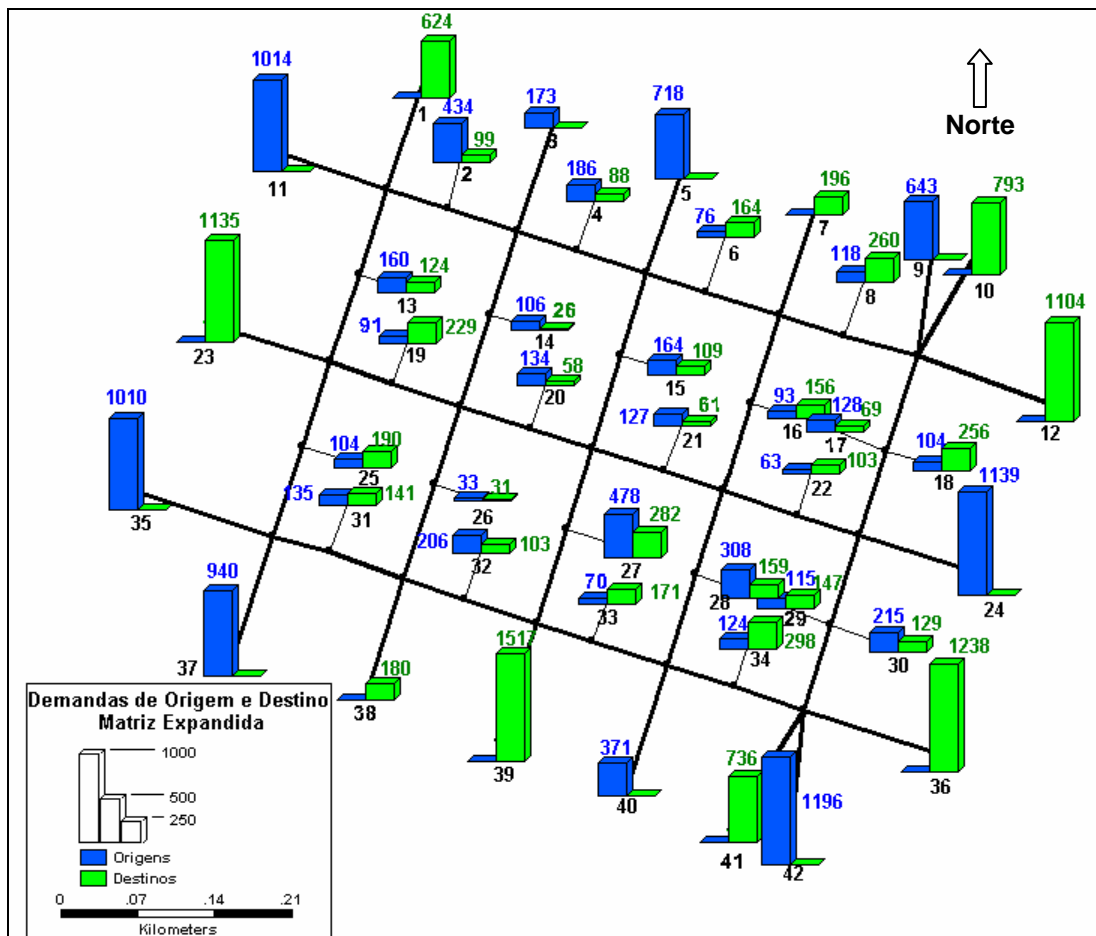


Figura 3.19: Demanda de origem e destino da matriz OD expandida

CAPÍTULO 4

ANÁLISE DAS MATRIZES ESTIMADAS PARA A ÁREA DE ESTUDO DO CASO

Este capítulo apresenta todo o processo realizado de estimação sintética de matrizes OD, a partir de contagens volumétricas. O capítulo é iniciado com uma descrição da coleta e codificação dos dados utilizados pelo aplicativo QueensOD, que foi o escolhido para estimar as matrizes OD da área de estudo do caso, detendo-se mais nos aspectos práticos de sua utilização, visto que seu modelo de estimação já foi descrito no capítulo de revisão bibliográfica. Após essa descrição, é apresentada a etapa de calibração do QueensOD, seguida de uma análise de sensibilidade dos resultados de estimação quanto à variação da qualidade da matriz OD semente fornecida e a quantidade de informações de fluxos utilizadas. Por fim, é avaliada a variabilidade das demandas estimadas para diferentes períodos de um dia e ao longo de dias típicos de meses típicos.

Definida a área de estudo e realizada a sua caracterização, foi iniciado o processo de estimação de matrizes OD utilizando o aplicativo QueensOD. A escolha desse aplicativo deveu-se, além da disponibilidade para uso na Universidade Federal do Ceará (UFC), à obtenção de resultados satisfatórios na sua utilização em redes urbanas semaforizadas como nos estudos de RAKHA *et al.* (1998b), VAN AERDE *et al.* (2003) e DEMARCHI *et al.* (2004). Esse último estudo, por exemplo, estimou matrizes OD para a região central da Cidade de Maringá, estado do Paraná, com uma rede de 39 semáforos e com características semelhantes à área de estudo desta pesquisa.

4.1 COLETA E CODIFICAÇÃO DOS DADOS

As primeiras etapas do processo de estimação das matrizes OD consistiram na coleta e na codificação de todas as informações utilizadas pelo modelo implementado no QueensOD. Como apresentado no Capítulo 2 (ver Figura 2.16), para estimar matrizes OD a partir de contagens volumétricas, o QueensOD requer uma série de arquivos de entrada obrigatórios (nós, arcos, semáforos e volumes) e

opcionais (matriz OD semente e conversões). Deste modo, todas as informações necessárias para a codificação desses arquivos foram coletadas, como apresentado a seguir.

4.1.1 Geometria da Rede

No arquivo de nós e de arcos são definidas as características geométricas da rede. Após a representação da rede simulada e identificadas as zonas de origem e destino, cada nó e arco deve ser enumerado com um identificador (ID). Na Figura 4.1 é apresentada a rede simulada com os respectivos IDs de nós e arcos. Destaca-se que os arcos de sentido duplo recebem dois IDs, um para cada sentido. Após a identificação, obtiveram-se 79 nós, sendo 42 de origem e/ou destino e 37 intermediários, e 114 arcos.

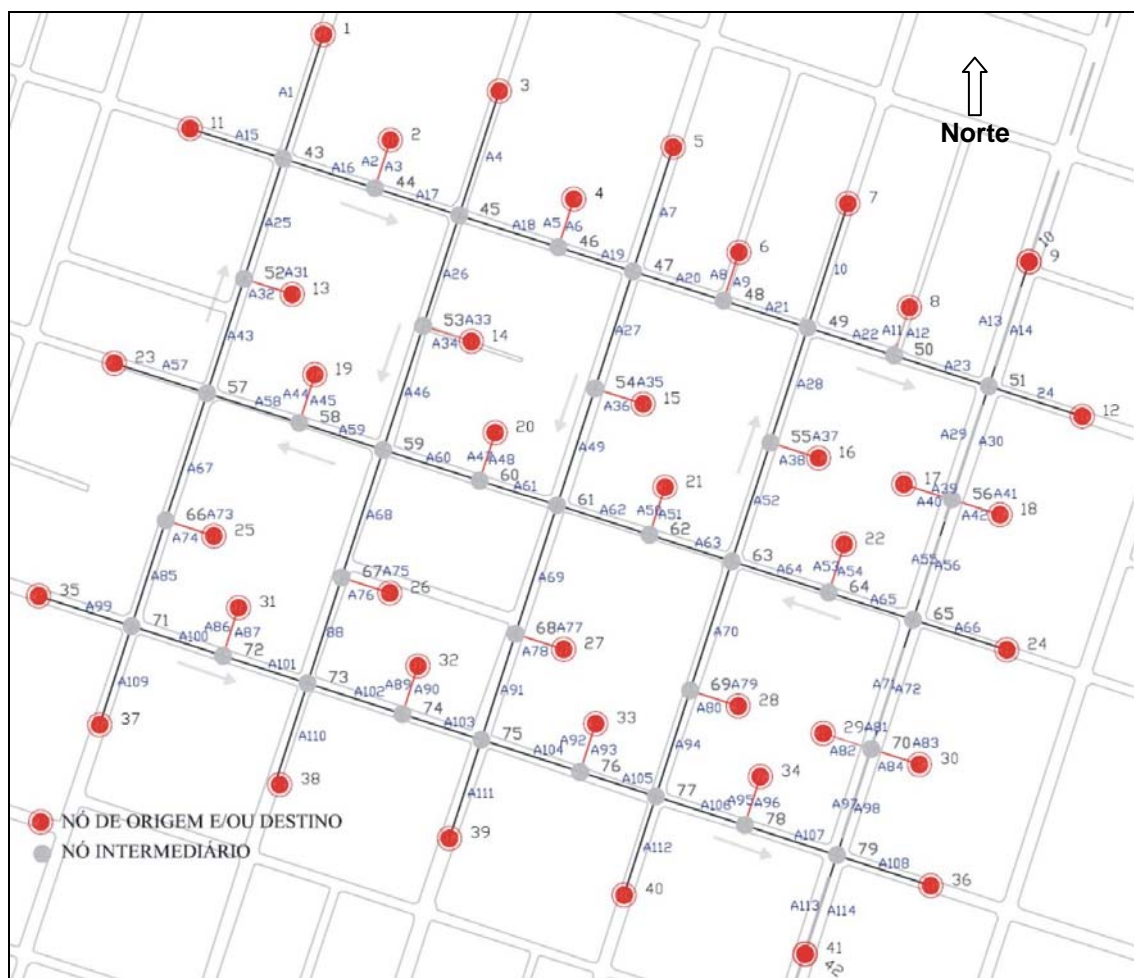


Figura 4.1: Identificação dos nós e arcos da rede

No arquivo de nós, cada linha do arquivo é iniciada com o ID do nó, seguido de suas coordenadas (ordenada e abscissa) e do seu tipo (origem, destino, origem/destino, intermediário). As coordenadas desses nós foram extraídas de um mapa da região digitalizado no formato *dwg* (AutoCAD), obtido junto a PMF. No arquivo de arcos, semelhante ao arquivo de nós, cada linha é iniciada com um ID, que representa um determinado arco. Em seguida, são informados os nós inicial e final do arco, além de seu comprimento, obtido a partir do mapa digitalizado, velocidade de fluxo livre, considerada igual à velocidade máxima da via, e capacidade. O QueensOD trabalha com a capacidade no arco e não na interseção, deste modo, a capacidade foi estimada em função do fluxo de saturação utilizado pelo modelo de tráfego do SCOOT da interseção semaforizada mais próxima. No Anexo II são apresentados estes arquivos codificados no formato estabelecido para o QueensOD.

4.1.2 Controle do Tráfego

No arquivo de arco também é definido o tipo de controle e os movimentos de conversão proibidos. Para a rede simulada, apenas as conversões à esquerda na Avenida Barão de Studart foram proibidas. O QueensOD permite três tipos de controle de tráfego, que são: sinalização de parada obrigatória (placa “PARE”), sinalização de “dê a preferência” e semáforo. No caso da existência de semáforo, é necessário definir ainda no arquivo de arcos qual semáforo é responsável por controlar o arco e em qual fase do semáforo o arco tem direito de passagem. Neste caso, é necessário criar também um arquivo de semáforo, onde são listados todos os semáforos da rede, enumerados com um ID, com sua respectiva programação semaforica (ciclo, fases, defasagem, tempo de verde e amarelo). Na Figura 4.2, são apresentados os tipos de controle da área de estudo. De um total de 15 interseções, sete possuem o controle com placa de parada obrigatória e oito são controladas por semáforo. O arquivo de semáforos está apresentado no Anexo II.

É importante destacar, como citado por DEMARCHI *et al.* (2004), que, aparentemente, o QueensOD, no momento da estimação, não considera as restrições de conversão definidas no arquivo de arcos. Esta conclusão se baseou nos resultados encontrados de estimação, em que a matriz OD estimada apresentou demandas entre pares OD que não possuíam rotas possíveis devido às restrições estabelecidas. Como será visto mais adiante, essa constatação também foi confirmada nesse estudo.



Figura 4.2: Tipos de controle da área de estudo

4.1.3 Fluxo de Tráfego Observado

A última informação obrigatória coletada foi o dado de fluxo de tráfego observado dos arcos que possuíam laço de detecção. Além dos dados de volume do dia da pesquisa de placa (07/06/06), foram coletados, ainda, os dados de fluxo de tráfego dos dias de terça, quarta e quinta-feira dos meses de abril, maio e junho de 2006 (totalizando 41 dias). Estes dados foram coletados para o horário de análise da pesquisa (17h15 e 18h15), com o intuito de estimar 41 matrizes OD, uma para cada dia de dados de fluxo coletado, permitindo avaliar a variabilidade da demanda ao longo dos dias. Foram coletados ainda, para o dia da pesquisa de placa, os dados de fluxo para o horário de entre-pico da manhã, entre 9h00 e 10h00, a fim de permitir uma avaliação da variabilidade da matriz OD ao longo do dia.

Na Figura 4.3, são apresentados os arcos que possuem laço de detecção (24 de um total de 114). Para esses mesmos arcos, foram coletados ainda os tempos de viagem observados, obtidos a partir da velocidade média do tráfego no arco durante o período em que os dados de fluxos foram coletados. É importante destacar que tanto os dados de fluxo de tráfego, quanto os dados de tempo de viagem foram obtidos de forma automática a partir de consultas ao banco de dados dinâmico do CTAFOR, com o auxílio da interface TRANSCOOT desenvolvida por MENESES (2003). Em conjunto com esses dados, são fornecidos também os dados de capacidade e de tempos de viagem de fluxo livre, obtidos em função da velocidade de fluxo livre, que são utilizados pelo QueensOD para compor as rotas utilizadas entre os diversos pares OD. Observa-se que a informação de capacidade já tinha sido fornecida no arquivo de arcos, mas devem ser novamente codificadas no arquivo de fluxos. No Anexo II, é apresentado o formato do arquivo de fluxos, com as informações referentes ao dia da pesquisa de placa.

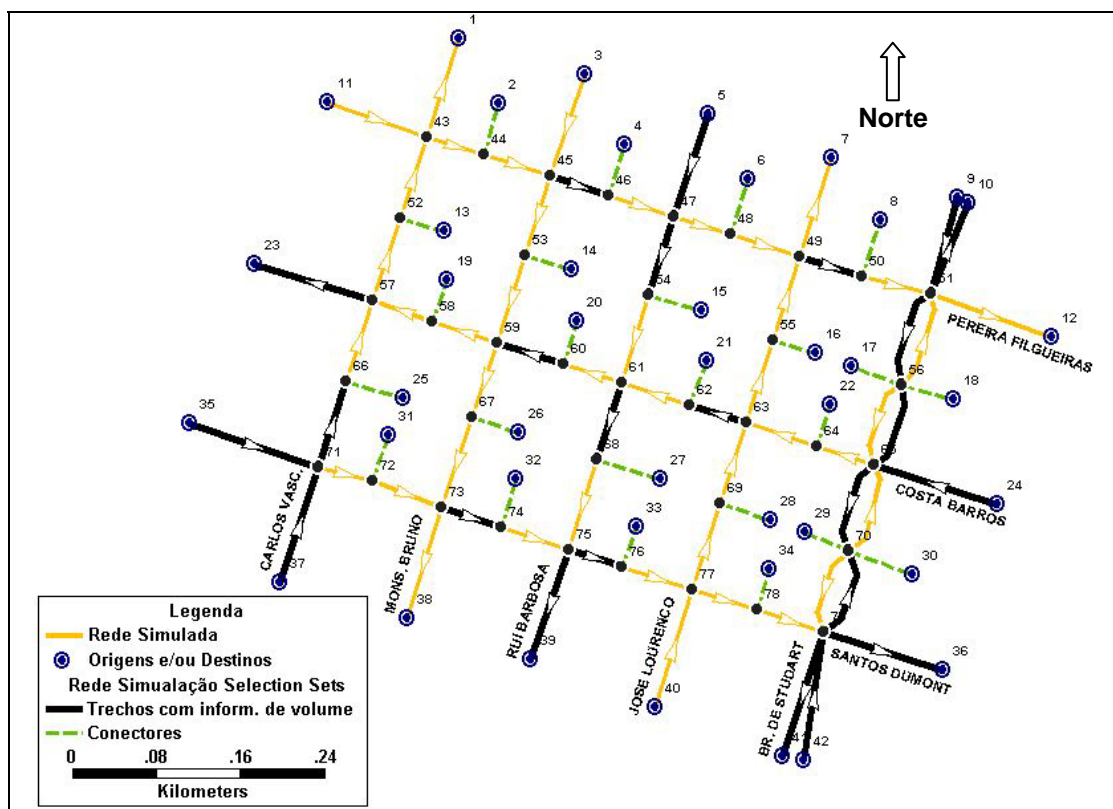


Figura 4.3: Arcos da rede simulada que possuem laço de detecção

Para que esses dados fossem utilizados para estimar matrizes OD foi necessário, primeiramente, a realização de um tratamento. Esta etapa buscou

identificar dentro dos dados obtidos, observações atípicas, ou seja, dados que apresentassem valores distantes de uma tendência central. Esse tratamento foi realizado a partir do fluxo de tráfego, sendo os demais dados considerados atípicos ou não em função dessa variável, ou seja, se o dado de fluxo, para um determinado dia, fosse considerado atípico, os demais dados também seriam. Para tanto, o processo aqui utilizado baseou-se no método proposto por OLIVEIRA (2004), que utilizou diagramas de caixa, ou *boxplot*, para identificar observações atípicas de uma determinada amostra. O diagrama de caixa é um gráfico que descreve uma série de características de um conjunto de dados, tais como tendência central, dispersão, assimetria e permite a identificação de valores atípicos, conhecidos como *outliers* (MONTGOMERY e RUNGER, 2003). São considerados *outliers* os valores avaliados que permanecerem fora de um intervalo estabelecido a partir da estatística amplitude interquartil, que é a diferença entre o primeiro e o terceiro quartil de um conjunto de dados (OLIVEIRA, 2004), como apresentado na Figura 4.4.

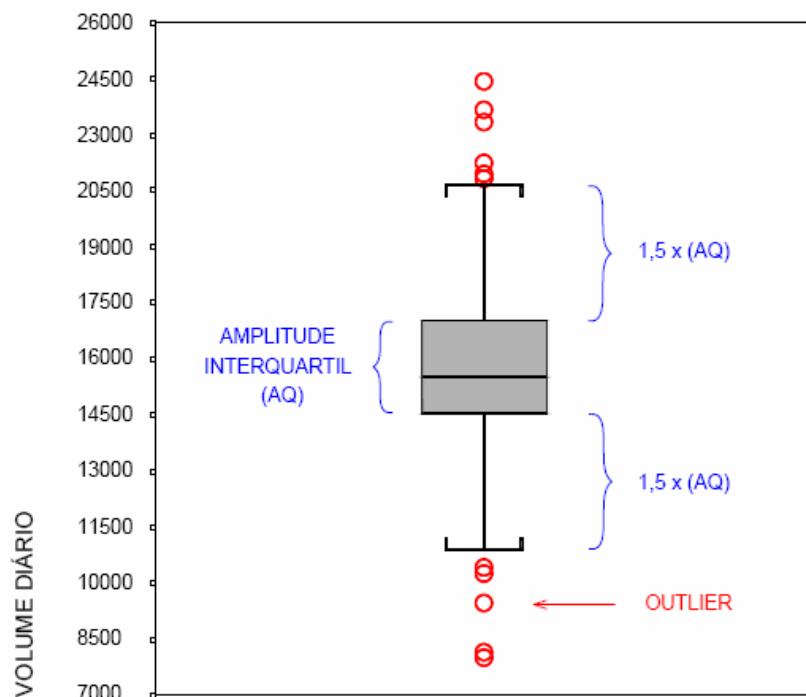


Figura 4.4: Exemplo de diagrama de caixa, fonte OLIVEIRA (2004)

Deste modo, todas as observações identificadas como *outliers* foram substituídas pelos valores médios, calculados já sem essa observação. Caso o interesse fosse apenas saber um valor aproximado da tendência central, poderíamos ter trabalhado apenas com o valor da mediana, que é uma estatística pouco sensível a

valores atípicos. Entretanto, o interesse é em cada observação, visto que serão estimadas matrizes OD para os diferentes dias observados. Na Figura 4.5 é apresentado o diagrama de caixa do laço de detecção 00054:a, localizado na Avenida Barão de Studart e que está associado ao arco com ID 71. Observa-se que foram criados diagramas de caixa para cada intervalo de 15 minutos do período de análise (17h15 -18h15). Neste caso, os dados do dia 06/06/06, do segundo intervalo, e do dia 02/03/06, terceiro intervalo, tiveram de ser substituídos pelos valores de fluxo médio.

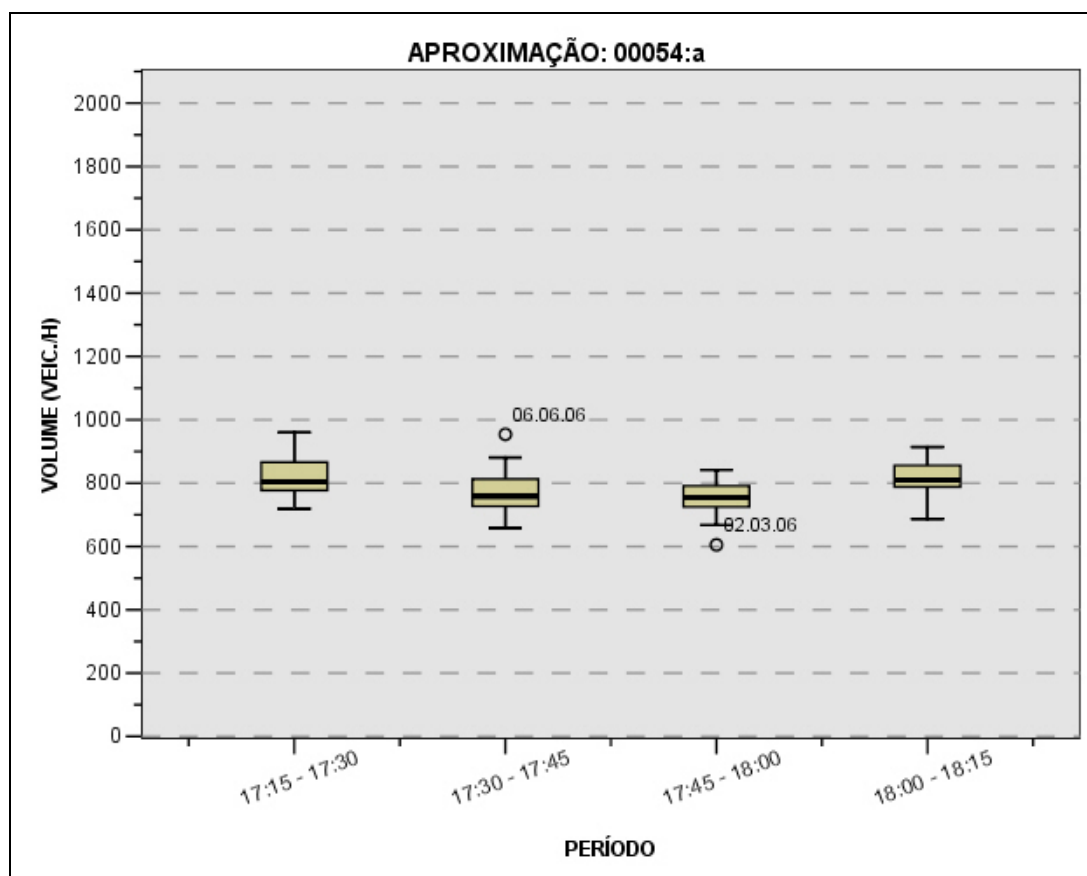


Figura 4.5: Diagramas de caixa da variável fluxo de tráfego do laço de detecção 054:a

Na Figura 4.6, é mostrado um exemplo em que os valores atípicos foram substituídos pelos valores médios. Esta figura está apresentando o diagrama de caixa do laço de detecção 00276:d, localizado na Avenida Santos Dumont e que está associado ao arco com ID 99, para o dia da pesquisa de placa. Observa-se que, no primeiro e segundo intervalos, os valores de fluxo observados foram muito baixos (inferiores a 200 veículos/hora), indicando que o laço de detecção deveria estar em falha nesse período.

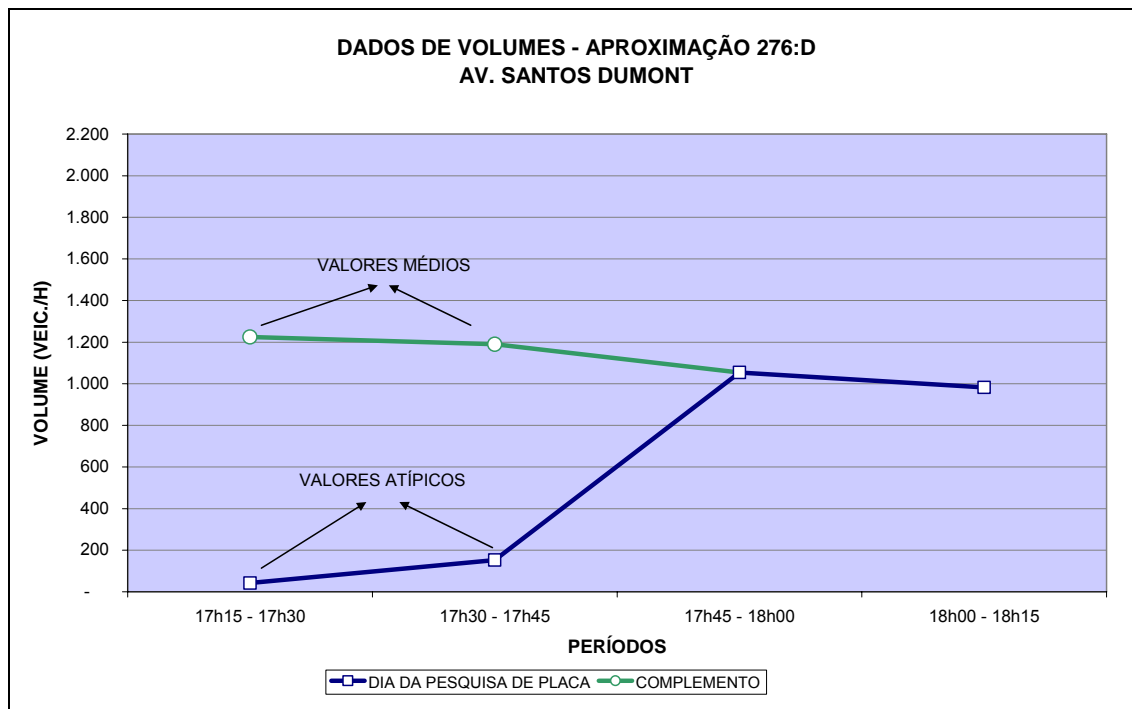


Figura 4.6: Substituição de valores atípicos por valores médios

Considerando apenas os dados de fluxos coletados para a análise de variabilidade ao longo dos dias, verificou-se que, de um total de 3936 observações (41 dias x 4 dias x 24 laços) apenas 167 foram consideradas atípicas (aproximadamente 4% do total). Apesar de ter sido encontrado uma quantidade pequena de observações atípicas, essa etapa foi fundamental, pois o intuito era trabalhar com as observações de cada dia de forma separada, sendo estimada uma matriz OD para cada dia. Como exposto anteriormente, caso o objetivo fosse trabalhar com um valor de tendência central, acredita-se que a mediana da amostra poderia representar bem esses dados, não justificando essa etapa de tratamento dos dados.

Feito isso para todos os laços de detecção, a etapa de tratamento dos dados foi concluída, sendo, em seguida, codificados os arquivos de fluxo. Lembrando que, quando o dado de fluxo de tráfego era substituído pelo valor médio, os dados de tempo de viagem também eram.

4.2 CALIBRAÇÃO DO MODELO DE ESTIMAÇÃO DO QUEENSOD

Com todos os dados coletados e com os arquivos de entrada codificados, foi iniciado o processo de calibração do modelo de estimação do QueensOD. Para tanto, foi definido inicialmente o número máximo de iterações possíveis (1.000 iterações), o critério de convergência para os erros de demanda e fluxos (0,01) e a quantidade máxima de rotas utilizadas entre cada par OD (cinco rotas), além de outros parâmetros menos importantes. A quantidade de 1.000 iterações e de cinco rotas são os limites que podem ser definidos na versão do QueensOD utilizado pela UFC.

Esta etapa de calibração consistiu em verificar apenas quais critérios de erros eram os mais adequados para a rede simulada já que os demais parâmetros do modelo de estimação são fixos. Apesar de *DERMACHI et al.* (2004) terem recomendado a utilização do erro relativo (Equação 2.30) para minimizar as diferenças entre as viagens da matriz OD semente e estimada, e o erro quadrático (2.29) para minimizar as diferenças entre fluxos observados e estimados, esta calibração se justifica, pois no trabalho de *DEMARCHI et al.* a estimação da matriz OD foi realizada sem o fornecimento de uma matriz OD semente, sendo a eficiência da estimação analisada apenas em função da replicação dos fluxos observados.

Tanto o número de iterações, como o critério de convergência dos erros, a quantidade máxima de rotas utilizadas e quanto os critérios de erros utilizados são definidos em um arquivo mestre. Além dessas informações, nesse arquivo são informados ainda os nomes dos arquivos codificados e os nomes dos arquivos de saída que contém os resultados da estimação. No Anexo II, é apresentado um exemplo do arquivo mestre.

Para a calibração do modelo, foram definidos, inicialmente, três cenários distintos quanto à matriz OD semente a ser fornecida ao QueensOD. O primeiro cenário consistiu em fornecer uma matriz OD semente binária, com demanda igual a um, entre os pares OD que tiveram viagens identificadas na pesquisa de placa, e demanda igual a zero, caso contrário. No segundo cenário a matriz OD semente foi a matriz OD amostral obtida durante a pesquisa de placa. Já no terceiro cenário foi fornecida a matriz OD expandida como matriz semente. Em cada cenário definido, foram realizadas nove estimções, com combinações diferentes de critérios de erro (quadrático, poissoniano e relativo) utilizados para avaliar as diferenças das demandas e dos fluxos, como apresentado na Tabela 4.1. Em seguida, os resultados das

estimações foram avaliados a partir da técnica de regressão linear, sendo as matrizes OD estimadas confrontadas com a matriz OD expandida, considerada como matriz OD observada na população dos deslocamentos realizados.

Tabela 4.1: Cenários de estimação para calibração do QueensOD

MATRIZ SEMENTE								
BINÁRIA			AMOSTRAL			EXPANDIDA		
ERRO ENTRE DEMANDAS/FLUXOS			ERRO ENTRE DEMANDAS/FLUXOS			ERRO ENTRE DEMANDAS/FLUXOS		
EQ / EQ	EP / EQ	ER / EQ	EQ / EQ	EP / EQ	ER / EQ	EQ / EQ	EP / EQ	ER / EQ
EQ / EP	EP / EP	ER / EP	EQ / EP	EP / EP	ER / EP	EQ / EP	EP / EP	ER / EP
EQ / ER	EP / ER	ER / ER	EQ / ER	EP / ER	ER / ER	EQ / ER	EP / ER	ER / ER

EQ: erro quadrático; EP: erro poissoniano; ER: erro relativo.

4.2.1 Calibração do Critério de Erro para as Diferenças entre os Fluxos Estimados e Observados

Analisando os resultados da estimação, quanto ao critério de erro utilizado para avaliar a diferença entre fluxos, observou-se que os resultados divergem pouco entre si, mostrando que, para a rede de estudo, esse parâmetro não influencia significativamente a qualidade da matriz estimada. Nas Figuras 4.7 e 4.8, em que são mostrados os gráficos de dispersão com as respectivas retas de regressão entre as demandas da matriz OD estimada e da matriz OD expandida (observada), é possível perceber essa constatação. Para essas estimações, foi fornecida a matriz OD semente amostral e utilizado o mesmo critério de erro para as demandas (erro relativo) e o erro quadrático para os fluxos na situação da Figura 4.7 e o erro poissoniano para os fluxos na situação da Figura 4.8. Observa-se que os gráficos são bastante semelhantes e que os resultados da regressão não permitem diferenciar, de modo significativo, um resultado do outro. Na Figura 4.9, é apresentado ainda o gráfico de dispersão entre as duas demandas estimadas para as situações descritas há pouco, mostrando que o resultado de estimação da matriz, no caso da rede da área de estudo, não é influenciado pelo critério de erro utilizado para calcular a diferença entre os fluxos observados e estimados. Essa constatação se manteve para as outras estimações realizadas. Em todos esses testes de regressão foi utilizado um grau de confiança de 95%.

Observou-se ainda que, em todas as estimações realizadas, o erro médio entre os fluxos estimados e observados foi próximo de zero. Nas Figuras 4.10, 4.11 e 4.12 é apresentado o diagrama de dispersão entre os fluxos estimados e observados

para o cenário em que foi fornecida, novamente, a matriz OD semente amostral e utilizado o critério de erro relativo para as demandas e todos os erros possíveis para calcular a diferenças entre os fluxos.

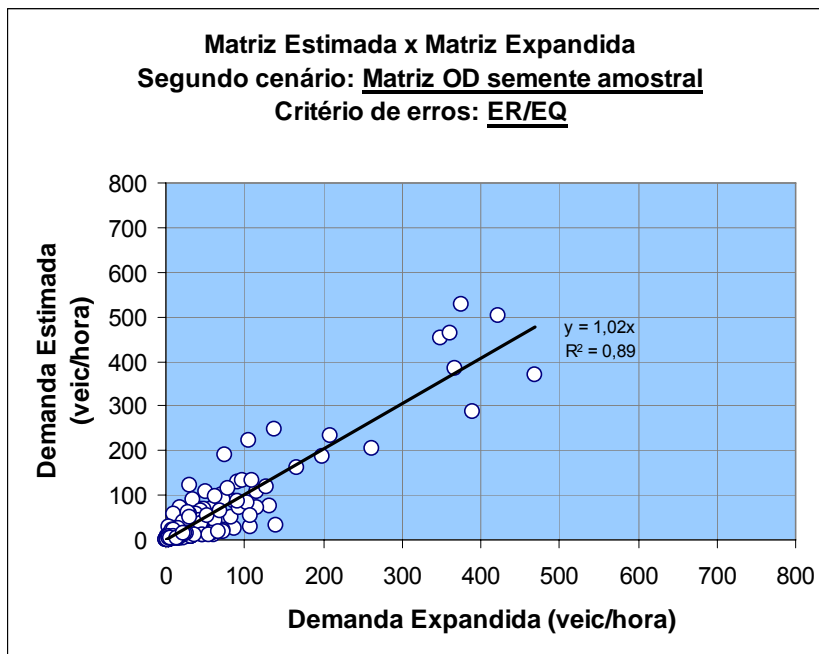


Figura 4.7: Diagrama de dispersão e reta de regressão das demandas para o segundo cenário utilizando o critério de erro relativo para as demandas e o erro quadrático para os fluxos

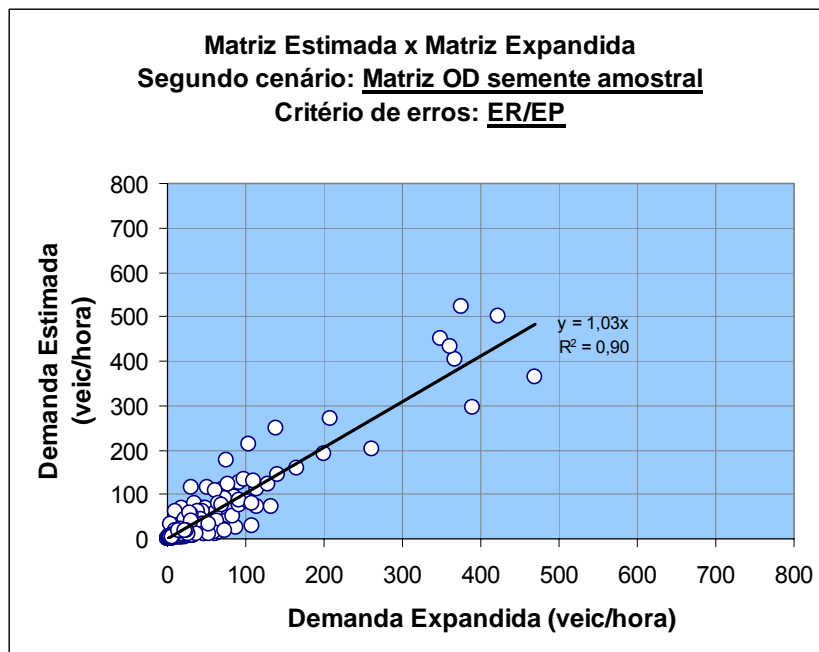


Figura 4.8: Diagrama de dispersão e reta de regressão das demandas para o segundo cenário utilizando o critério de erro relativo para as demandas e o erro poissoniano para os fluxos

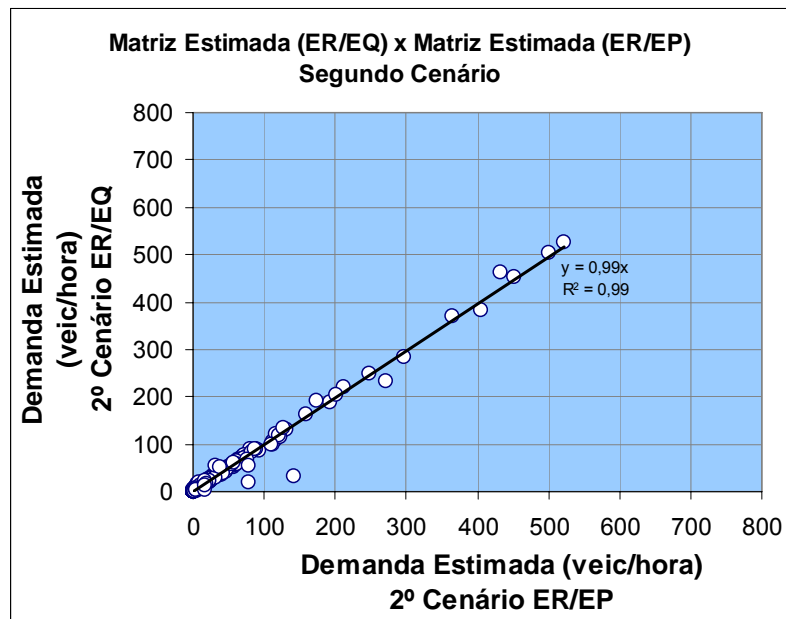


Figura 4.9: Diagrama de dispersão e reta de regressão das demandas estimadas para o segundo cenário

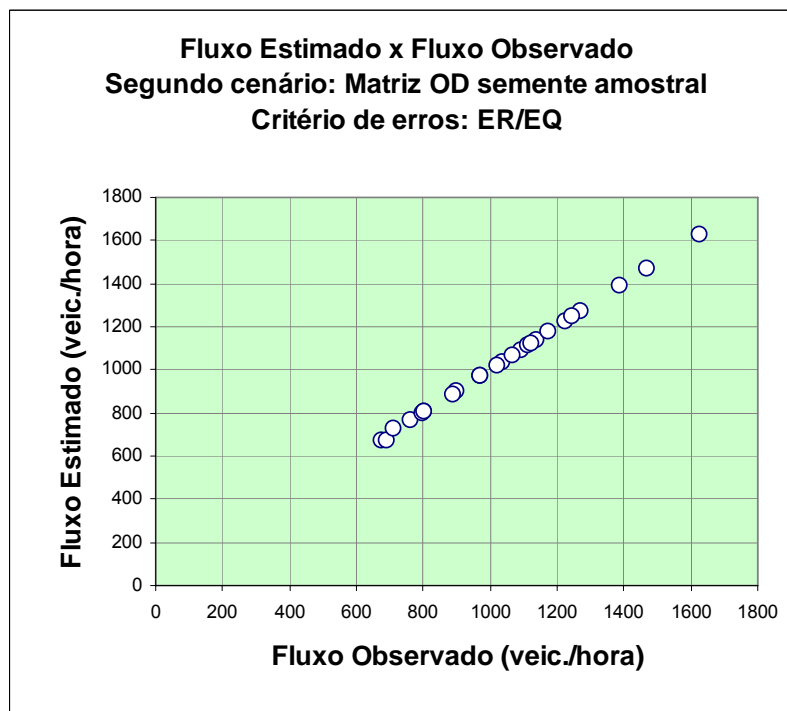


Figura 4.10: Diagrama de dispersão entre os fluxos para o segundo cenário utilizando o critério de erro relativo para as demandas e o erro quadrático para os fluxos

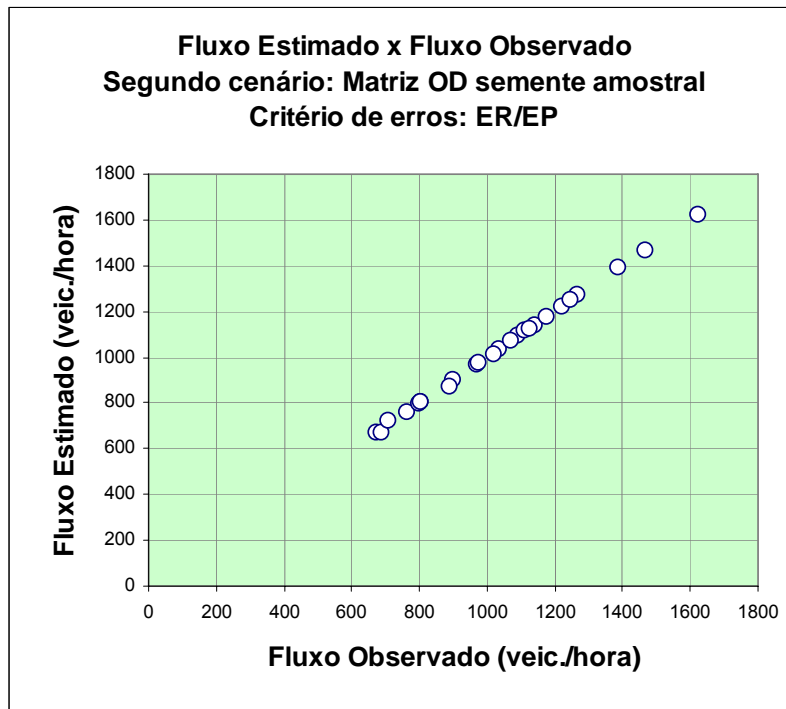


Figura 4.11: Diagrama de dispersão entre os fluxos para o segundo cenário utilizando o critério de erro relativo para as demandas e o erro poissoniano para os fluxos

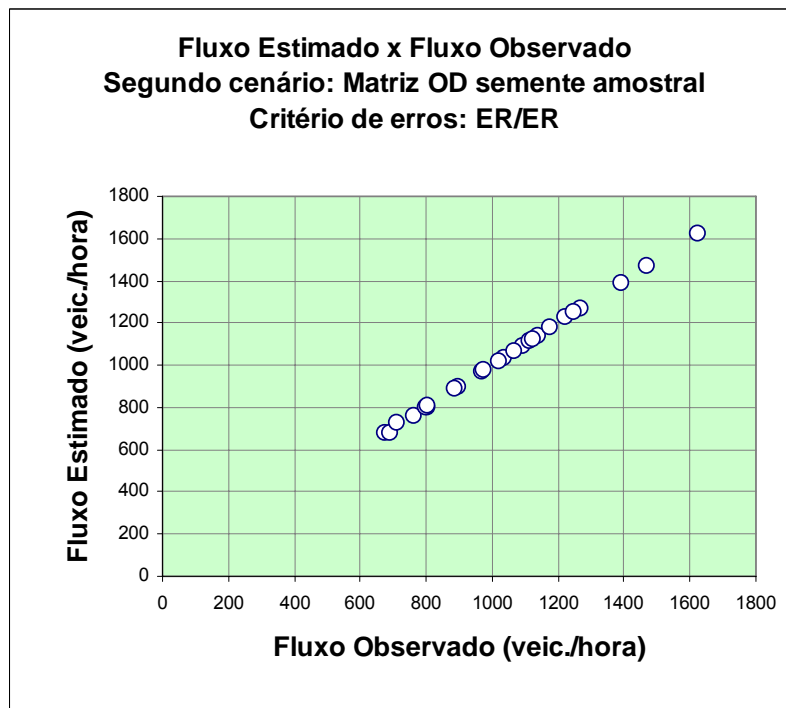


Figura 4.12: Diagrama de dispersão entre os fluxos para o segundo cenário utilizando o critério de erro relativo para as demandas e o erro relativo para os fluxos

4.2.2 Calibração do Critério de Erro para as Diferenças entre as Demandas Estimadas e Observadas

Após a calibração do critério de erro para as diferenças entre os fluxos, foi calibrado o critério de erro para avaliar as diferenças entre as demandas. Como observado na calibração anterior, os resultados da estimação, para a rede da área de estudo, não são influenciados pelo critério de erro definido para os fluxos. Deste modo, para a calibração do critério de erro das demandas foi fixado o critério de erro para os fluxos e os resultados de estimação foram, em seguida, avaliados. Neste caso, a calibração do critério de erro para as demandas foi realizada considerando o erro quadrático para calcular o erro entre os fluxos. As Figuras 4.13, 4.14 e 4.15 mostram os gráficos de dispersão, com as respectivas retas de regressão entre as demandas da matriz OD estimada e da matriz OD expandida (observada), utilizadas para calibrar o critério de erro a ser utilizado para a diferença entre as demandas. Nestes testes também foi utilizado um grau de confiança de 95%.

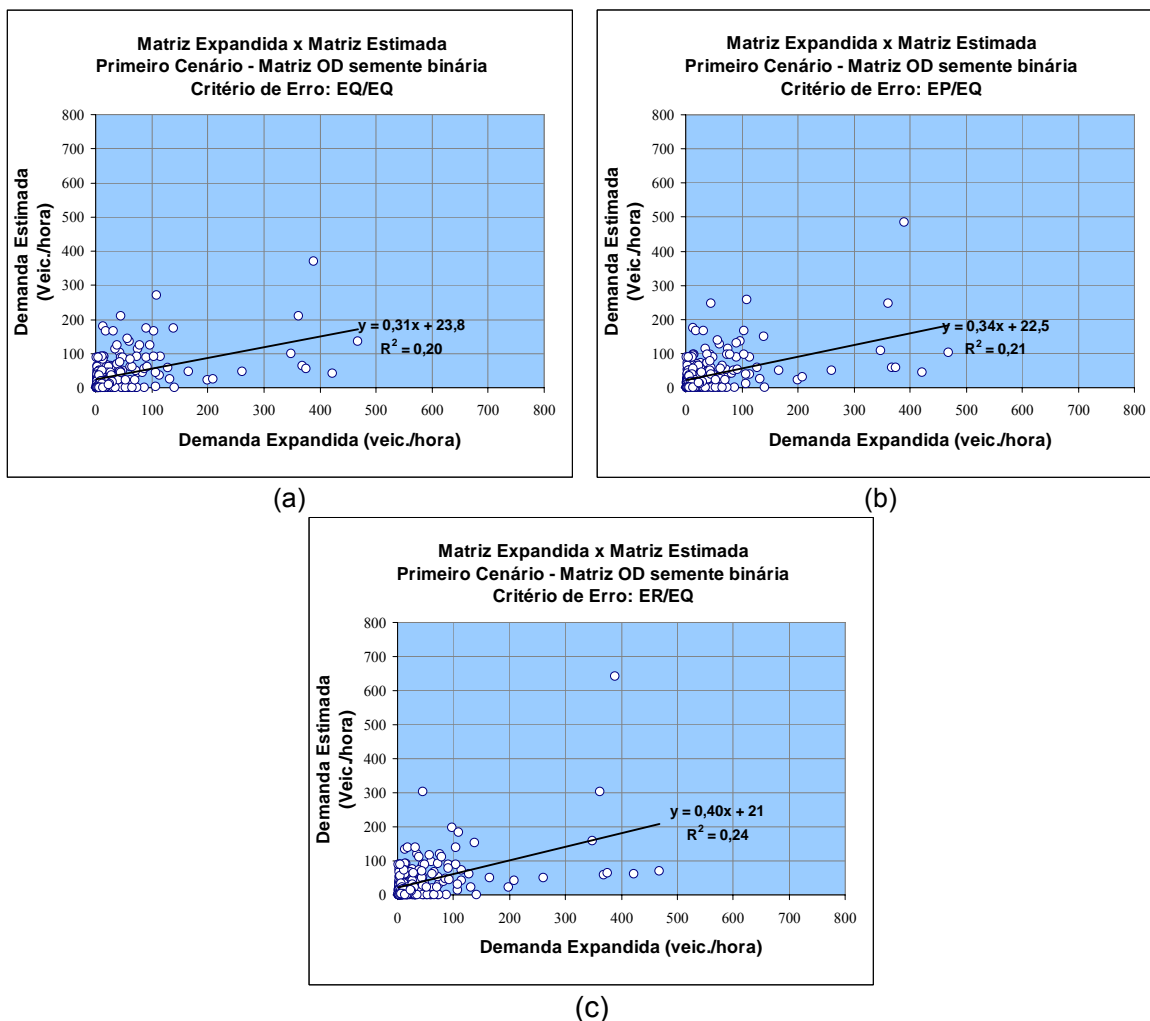
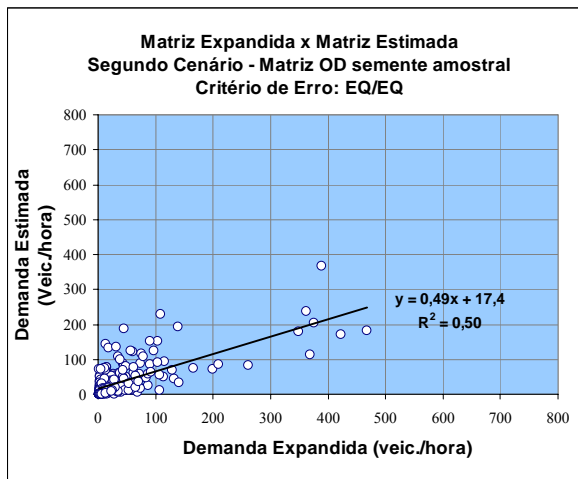
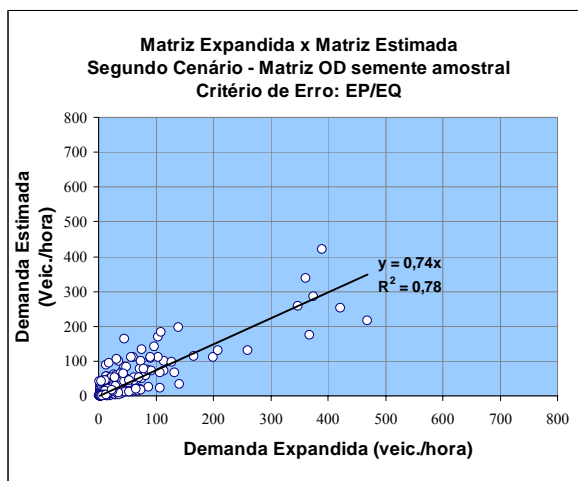


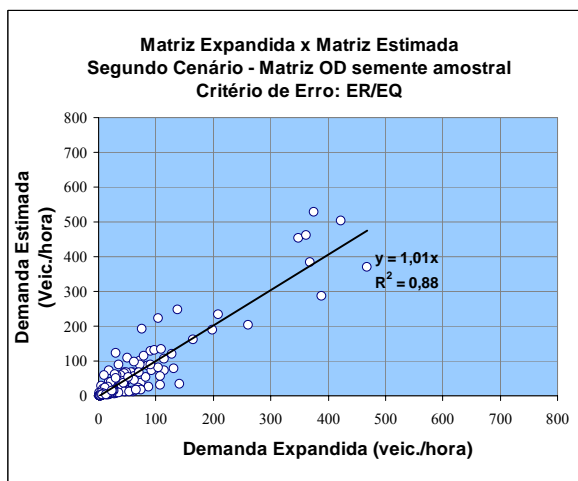
Figura 4.13: Diagramas de dispersão e reta de regressão das demandas, fornecendo a matriz OD semente binária, e utilizando os três critérios de erro para a demandas e o erro quadrático para os fluxos



(a)

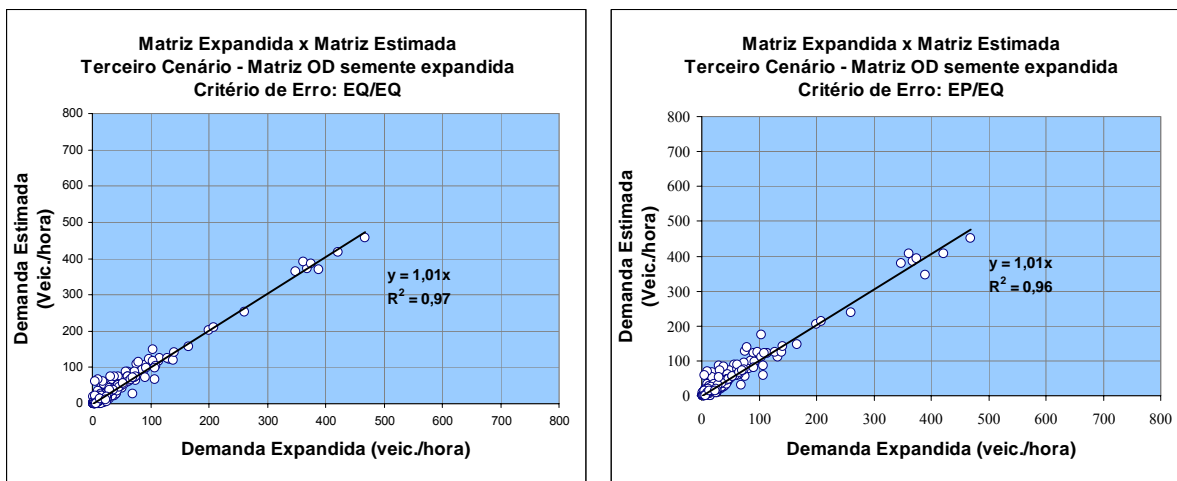


(b)



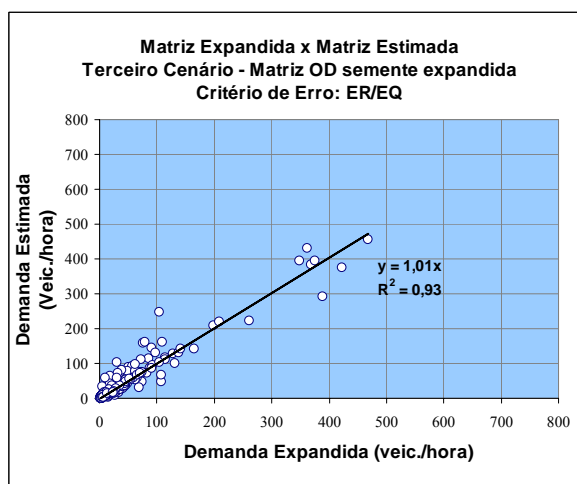
(c)

Figura 4.14: Diagramas de dispersão e reta de regressão das demandas, fornecendo a matriz OD semente amostral, e utilizando os três critérios de erro para as demandas e o erro quadrático para os fluxos



(a)

(b)



(c)

Figura 4.15: Diagramas de dispersão e reta de regressão das demandas, fornecendo a matriz OD semente expandida, e utilizando os três critérios de erro para as demandas e o erro quadrático para os fluxos

A Tabela 4.2 traz um resumo dos dados dos resultados das regressões realizadas mostrando os coeficientes de determinação (R^2) dos gráficos apresentados anteriormente.

Tabela 4.2: Resultados dos testes de regressão para calibração do critério de erro a ser utilizado

Critério de erro	Matriz semente		
	Binária	Amostral	Expandida
Quadrático	0,20	0,50	0,97
Poissoniano	0,21	0,78	0,96
Relativo	0,24	0,88	0,93

Constata-se, avaliando esses resultados, que, no cenário em que é fornecida uma matriz OD semente binária, os resultados dos testes de regressão foram semelhantes, com o coeficiente de determinação (R^2) próximo de 20%. Comparando, ainda, as matrizes OD estimadas nas três situações, não se percebem diferenças significativas, mostrando que, neste caso, o tipo de erro utilizado pouco interfere no resultado de estimação. Isto ocorre pois o fornecimento de uma matriz OD semente constante faz com que o QueensOD maximize a Equação 2.27, preocupando-se apenas em garantir a continuidade dos fluxos de tráfego (segunda parcela da equação) e em minimizar os erros entre os fluxos estimados e observados.

Já no cenário da matriz OD semente amostral, os resultados diferiram entre si, sendo a estimação que utilizou o erro relativo a única que apresentou um resultado satisfatório, com um coeficiente de determinação igual a 0,88, confirmando, para este caso, a recomendação feita por DERMACHI *et al.* (2004). No último cenário, e de forma semelhante ao primeiro, as matrizes OD estimadas, comparadas entre si, apresentaram pequenas diferenças, mostrando que o tipo de erro utilizado pouco interfere no resultado de estimação. Neste caso, o coeficiente de determinação (R^2) ficou em torno de 95%.

Diante dos resultados expostos, constata-se que a definição do critério de erro para calcular as diferenças entre os fluxos estimados e observados, para a rede simulada, não é relevante para o resultado da estimação. Do mesmo modo, esta constatação também se aplica ao critério de erro para calcular as diferenças entre as demandas estimadas e expandidas (observadas) quando é fornecida uma matriz OD semente binária ou a própria matriz OD expandida. Entretanto, para o cenário em que é fornecida uma matriz OD semente amostral, observou-se diferenças entre os resultados, indicando que o critério de erro relativo para calcular as diferenças entre as demandas é o mais apropriado para a rede simulada. No final desse processo, considerou-se que o modelo de estimação estava calibrado, optando-se por utilizar nas estimções seguintes o critério de erro relativo para calcular as diferenças entre as demandas e o critério de erro quadrático para calcular as diferenças entre os fluxos, semelhante à recomendação inicial de Demarchi *et al.* (2004).

No final da calibração, foi verificado ainda o efeito da definição das restrições de conversão e dos tipos de controle das interseções. Para tanto, essas informações foram retiradas do arquivo de arcos, deixando em branco a coluna referente a esta informação. Analisando os resultados de estimação, verificou-se que eles se

mantiveram, confirmando a suspeita de DEMARCHI *et al.* (2004) de que o QueensOD não considera as restrições de conversão e nem o tipo de controle das interseções no momento da estimação. Após essa constatação, fica a dúvida do motivo da obrigatoriedade da definição dessas informações na etapa de codificação dos dados.

4.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS RESULTADOS QUANTO À QUALIDADE DA MATRIZ OD SEMENTE

Os resultados da calibração permitiram ainda realizar uma análise de sensibilidade dos resultados de estimação das demandas quanto à qualidade da matriz OD semente. A partir das retas de regressão, percebe-se, que no cenário em que é fornecida uma matriz semente binária (Figura 4.13), as demandas da matriz OD estimada diferem consideravelmente da matriz OD expandida. Os coeficientes de determinação encontrados para este cenário não foram satisfatórios, apresentando valores abaixo de 25%. Nas regressões realizadas para esse cenário, verifica-se, ainda, que o teste de hipótese, para verificar a nulidade da constante da reta, rejeitou a hipótese nula, ou seja, pode-se afirmar que a constante da reta é significativamente diferente de zero. Nas estimações deste cenário foi observado um erro médio absoluto entre as demandas variando em torno de 30 viagens, e um erro máximo absoluto próximo de 400 viagens.

No cenário em que é fornecida uma matriz semente amostral (Figura 4.14), percebe-se a melhora na estimação da matriz OD em função do aumento da qualidade da matriz OD semente. Entretanto, como exposto anteriormente, apenas na situação em que foi utilizado o erro relativo para avaliar as diferenças entre as demandas, pode-se considerar o resultado como satisfatório. Nessas estimações o erro médio e máximo absoluto encontrados foram, respectivamente, próximos a 13 e 150 viagens.

O último cenário (Figura 4.15), que na realidade é um cenário fictício, pois não há interesse em estimar uma matriz OD a partir da própria matriz observada em campo, apresentou, como esperado, os melhores resultados de estimação, com os coeficientes de determinação próximos de 100%. Nas estimações desse cenário, o erro médio absoluto foi próximo de oito viagens e erro máximo absoluto próximo de 140 viagens.

Contata-se, frente a esses resultados, que, para uma estimação satisfatória de uma matriz OD, é necessário o fornecimento de uma matriz semente de qualidade,

que forneça informações sobre o padrão de deslocamento da população, como no caso do cenário em que foi fornecida uma matriz OD semente amostral. Apesar de uma determinada matriz OD ser a mais provável de ocorrer em campo, de acordo com o princípio da entropia proposto por WILSON (1970), não necessariamente ela será a matriz que melhor representará, na realidade, o comportamento de deslocamento de uma população, mesmo que replique os fluxos de tráfego observados. Ou seja, não há nenhuma garantia de que a matriz OD estimada, quando não é fornecida uma matriz OD semente de qualidade, será a matriz OD que ocorrerá realmente em campo, como observado nos resultados de estimação.

4.4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS RESULTADOS QUANTO À QUANTIDADE DE INFORMAÇÕES DE FLUXOS DE TRÁFEGO UTILIZADAS

Realizada a análise de sensibilidade dos resultados da estimação quanto ao fornecimento de matrizes OD sementes distintas, foi iniciada a análise dos resultados da estimação quanto à quantidade de informações de fluxo de tráfego utilizadas. As estimações realizadas, até então, com o auxílio do QueensOD, utilizaram como informação de fluxo do tráfego todos os dados dos laços de detecção existentes na área de estudo, como apresentado na Figura 4.3 (24 no total). A partir desse cenário, foram definidos mais dois cenários com configurações distintas quanto à quantidade de informações de fluxo de tráfego, um aumentando a quantidade de arcos com dados de fluxo e outro diminuindo essa quantidade.

Antes de apresentar esses cenários, é importante destacar uma observação feita durante as estimações realizadas na etapa de calibração, que foi importante para a elaboração desses novos cenários. Nos resultados da estimação, quando foi fornecida uma matriz OD semente binária, observou-se que o modelo de estimação do QueensOD manteve algumas demandas com valor igual a 1 (36 de um total 312 demandas existentes). Analisando essas demandas, verificou-se que, nas possíveis rotas entre o par OD, não havia nenhuma informação de fluxo do tráfego. Deste modo, foi levantada a hipótese de que o QueensOD desconsidera, no processo de estimação, os pares OD que não possuem informações de fluxos nas rotas utilizadas. Esta hipótese foi confirmada após a estimação de uma nova matriz OD, utilizando-se agora uma matriz semente constante com as demandas iguais a 50. Deste modo, as demandas que anteriormente tiveram valores estimados iguais a 1, passaram a ter

demandas estimadas iguais a 50. Na Figura 4.16, são apresentadas as rotas que não possuem informações de fluxo de tráfego.

Deste modo, para a análise aqui proposta, além do cenário com todas as informações provenientes dos laços de detecção (definido como primeiro cenário), foi criado um segundo cenário em que o conjunto de informações de fluxos existente foi complementado com novos dados de fluxos, coletados a partir de pesquisas volumétricas em arcos da rede que pertencessem às rotas destacadas na Figura 4.16. Já o terceiro cenário proposto consistiu em reduzir a quantidade de informações provenientes dos laços de detecção.

Este último cenário é um cenário fictício e serviu apenas para a avaliação do comportamento do modelo de estimação do QueensOD frente a essa nova configuração de dados de fluxos. Neste cenário, foram definidas três configurações de vias distintas quanto à quantidade de arcos com informações de fluxos de tráfego. A primeira configuração foi definida para a Rua Pereira Filgueiras, que possui dois arcos com dados de fluxo e passou a ter apenas um arco com essa informação. Uma outra configuração foi definida para a Rua Costa Barros, que possuía informação em quatro arcos, incluídos os arcos de entrada e saída da via, e passou a ter informações em apenas dois arcos. Neste caso, foi retirada a informação de fluxo de um arco de saída, afim de avaliar a importância dessa informação no processo de estimação. A última configuração foi definida para a Avenida Santos Dumont, em que as informações de dois arcos intermediários foram excluídas, ficando apenas informações de fluxo nos arcos de entrada e saída dessa via.

A Figura 4.17, referente ao segundo cenário, apresenta os arcos que tiveram informações de fluxo coletadas posteriormente para a análise proposta. Observa-se que foram escolhidos arcos de entrada e saída da rede, buscando reduzir ao máximo a quantidade de rotas sem informação de fluxos. Essas pesquisas volumétricas complementares foram realizadas no dia 13/09/06 (quarta-feira), no horário de análise da pesquisa entre 17h15 e 18h15. Já na Figura 4.18, referente ao terceiro cenário, são apresentados os arcos que tiveram as informações de fluxo retiradas (18, 63, 66, 102 e 104) durante o processo de estimação. Os fluxos observados na pesquisa para os arcos 4, 10, 15, 110 e 112 foram, respectivamente, 170, 200, 980, 180 e 370 veículos/hora. É importante destacar que, nas estimções realizadas nesta análise de sensibilidade, foi fornecida a matriz OD semente amostral, obtida na pesquisa de placa, e foram utilizados os critérios de erro definidos na etapa de calibração.

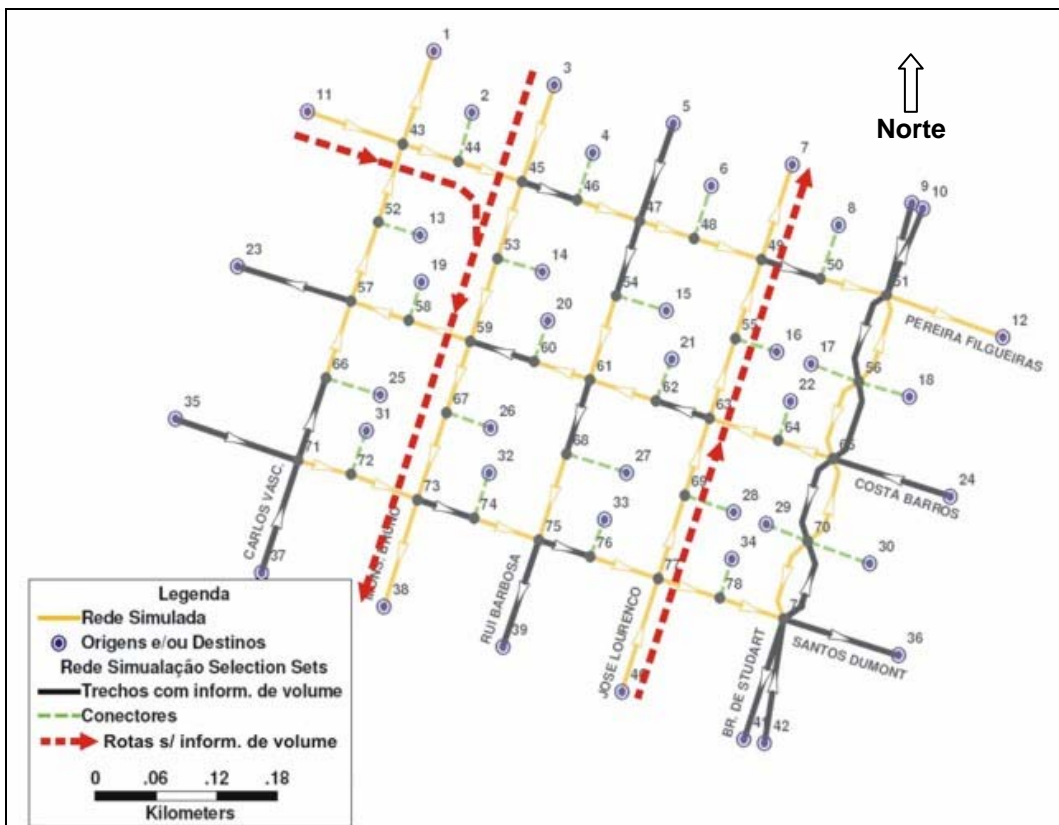


Figura 4.16: Rotas sem informação de fluxo de tráfego

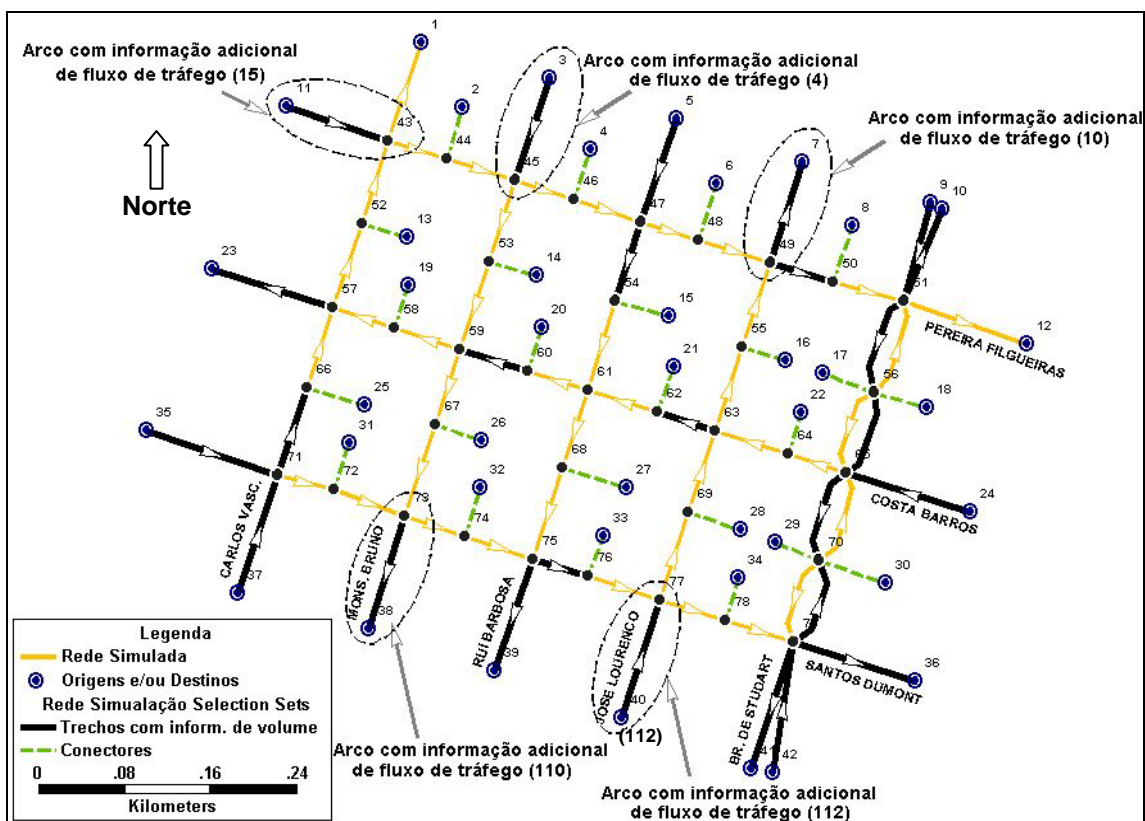


Figura 4.17: Segundo cenário de informações de fluxo de tráfego

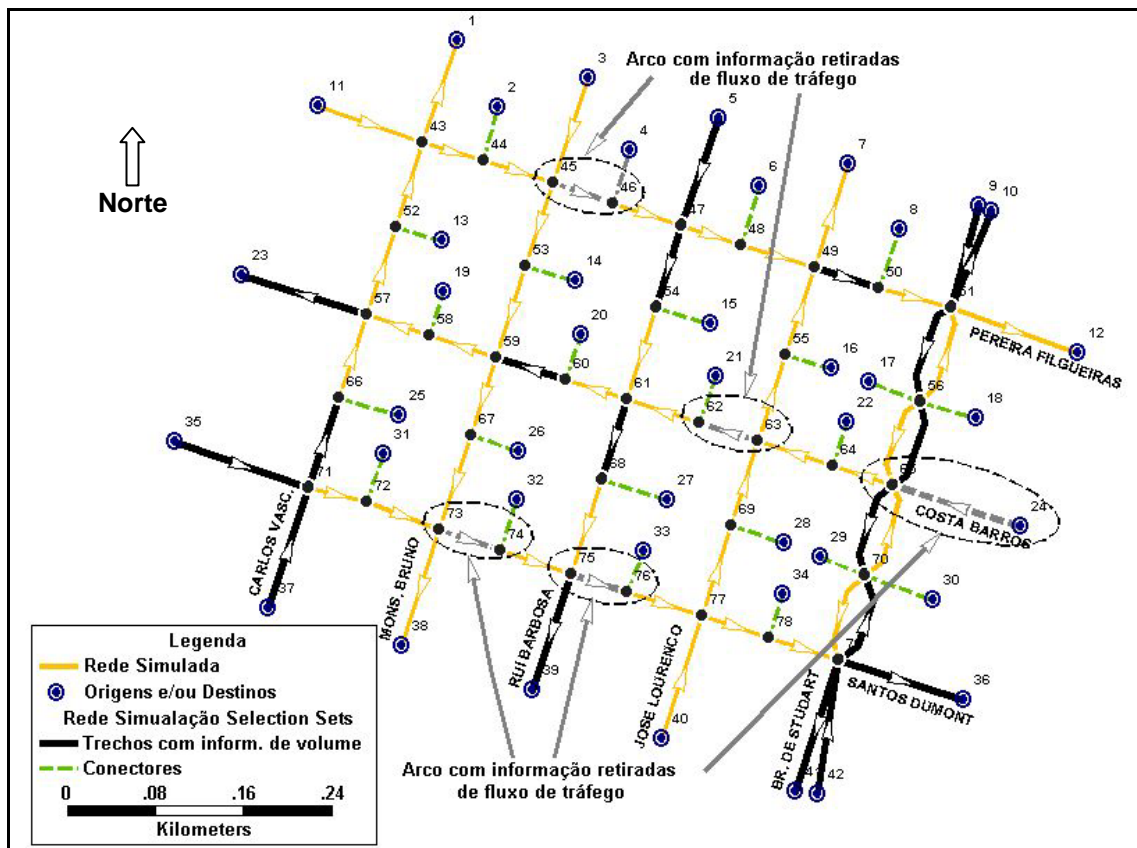
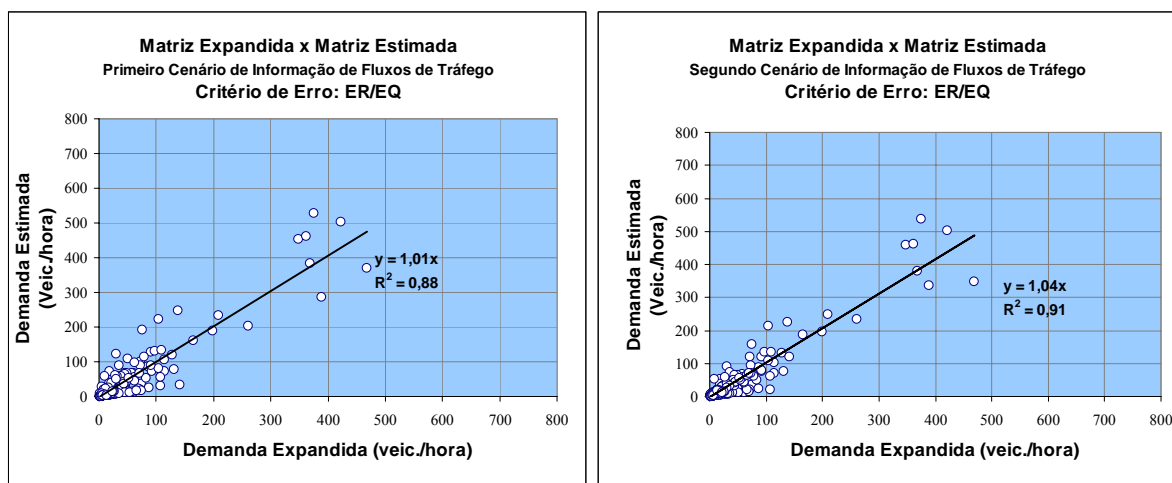


Figura 4.18: Terceiro cenário de informações de fluxo de tráfego

Os resultados de estimação das demandas para o segundo cenário, em que novas informações de fluxo foram coletadas, apresentaram, no geral, uma pequena melhora. O coeficiente de determinação (R^2) da regressão realizada entre a demanda estimada e expandida foi igual a 88% no primeiro cenário, enquanto que no segundo cenário foi de 91%, como pode ser observado na Figura 4.19. O erro médio absoluto para o segundo cenário baixou de 13 para 10 viagens e o erro máximo absoluto aumentou de 151 para 161 viagens.

Verifica-se que, no geral, os ganhos no resultado final foram muito pequenos. Entretanto, quando se analisam separadamente as demandas dos nós que são diretamente afetados pela falta de informação de fluxo, percebe-se um ganho mais significativo. Nas demandas com origem no nó 11, por exemplo, o erro médio absoluto e o erro máximo reduziram, respectivamente de 11 para 5 viagens, e de 108 para 45 viagens. Nas demandas com origem nas zonas 3 e 40, esses ganhos também foram observados. Nas zonas 3 e 40, o erro médio baixou, respectivamente, de 6 para 2 e de 17 para 4, e o erro máximo baixou, respectivamente, de 57 para 9. A Figura 4.20

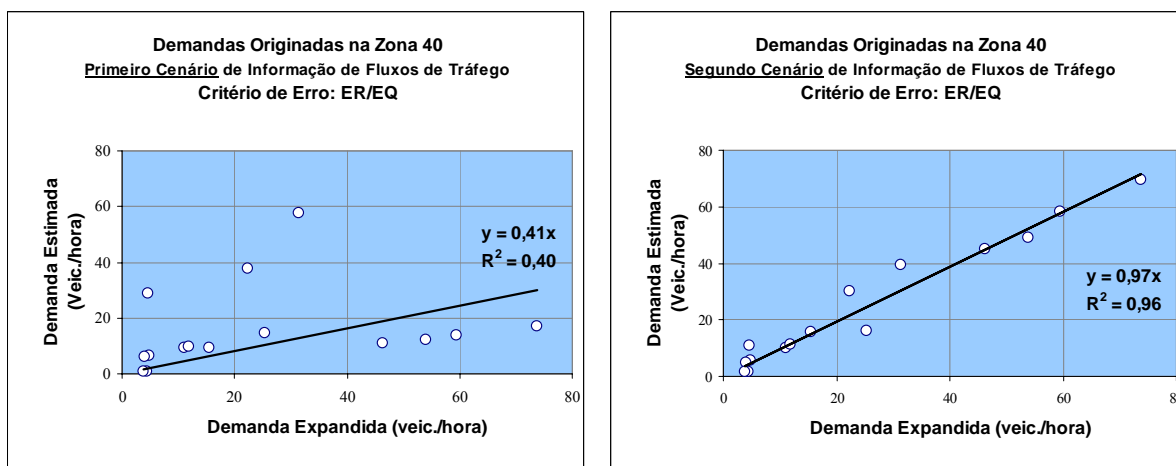
mostra o diagrama de dispersão das demandas originadas na zona 40, sendo possível perceber a melhora dos resultados no segundo cenário.



(a)

(b)

Figura 4.19: Diagrama de dispersão e reta de regressão das demandas estimadas para o primeiro (a) e o segundo (b) cenários de informação de fluxos de tráfego



(a)

(b)

Figura 4.20: Diagrama de dispersão e retas de regressão das demandas originadas na zona 40 para o primeiro (a) e o segundo (b) cenários de informações de fluxos de tráfego

Os resultados de estimação das demandas para o terceiro cenário, em que informações de fluxo foram retiradas do conjunto de dados, também não apresentaram diferenças significativas em relação aos resultados de estimação do primeiro cenário. O coeficiente de determinação da regressão entre as demandas estimadas e expandidas para este cenário foi igual ao do primeiro cenário com valor de 88% (ver Figura 4.21b). Da mesma forma, o erro absoluto médio encontrado foi o mesmo,

sendo igual a 13 viagens, e o erro máximo aumentou de 151 para 161 viagens. Destaca-se aqui que as demandas que deixaram de ter informações de fluxos nas rotas utilizadas foram desconsideradas pelo modelo de estimação e, conseqüentemente, tiveram seus resultados de estimação prejudicados.

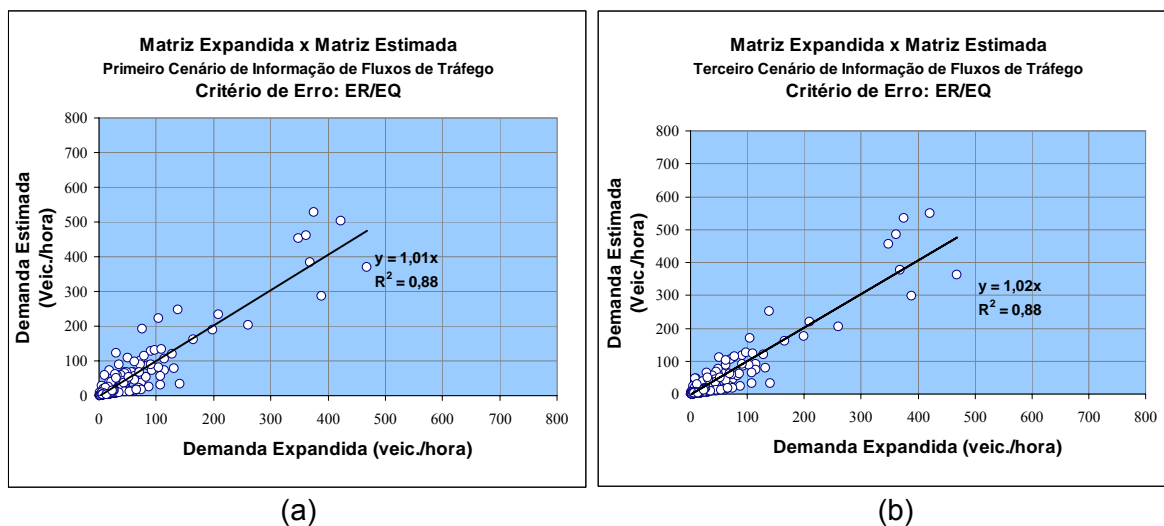
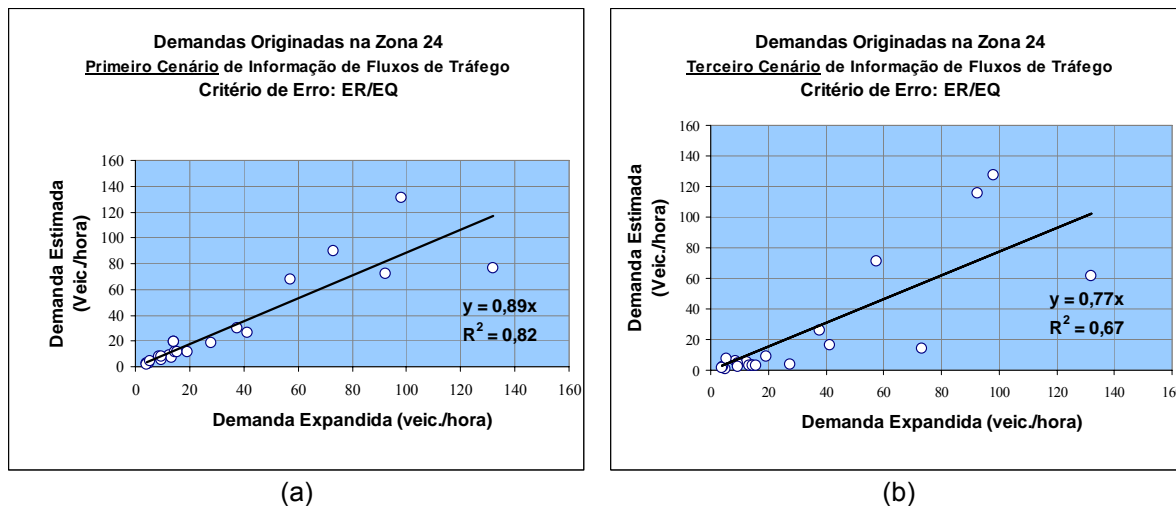


Figura 4.21: Diagrama de dispersão e reta de regressão das demandas estimadas para o primeiro (a) e o terceiro (b) cenários de informação de fluxos de tráfego

Analisando ainda algumas demandas separadamente, como no caso das demandas originadas no nó 11 (Rua Peirera Filgueiras), 24 (Rua Costa Barros) e 35 (Av. Santos Dumont), julgadas as mais afetadas pela retirada de informações de fluxos de tráfego, pode-se observar que os resultados de estimação para as zonas 11 e 35 obtiveram pequenas variações, diferente dos resultados de estimação encontrados na zona 24. No caso das zonas 11 e 35, os erros médios absolutos entre as demandas estimadas e expandidas se mantiveram: na zona 11 esse erro foi igual a 11 viagens e na zona 35 igual a 15 viagens. Os erros máximos também mantiveram os mesmos valores, sendo igual a 151 viagens para as demandas da zona 11, e igual a 160 viagens para as demandas da zona 35. Já para a zona 24, o erro médio absoluto aumentou de 12 para 21 viagens e o erro máximo aumentou de 81 para 134 viagens. Na Figura 4.22, é apresentado o diagrama de dispersão das demandas estimadas para a zona 24 para o primeiro e terceiro cenários de informação de fluxos de tráfego.



Figur 4.22: Diagrama de dispersão e retas de regressão das demandas originadas na zona 24 para o primeiro (a) e o terceiro (b) cenários de informações de fluxos de tráfego

A justificativa para uma diferença significativa nos resultados de estimação das demandas originadas na zona 24 está no fato de que o arco que teve a informação de fluxo retirada (arco 66) era um arco de saída da zona e funcionava praticamente como um conector dessa zona a rede. Deste modo, os dados de fluxo desse arco já informavam ao modelo de estimação a quantidade total de viagens originadas nessa zona, facilitando consideravelmente o processo de estimação. Com a retirada dessa informação de fluxo, o modelo deixou de possuir essa informação e, conseqüentemente, estimou com menos qualidade as demandas originadas nessa zona.

Os resultados desse teste de sensibilidade mostram que, para uma boa estimação de todas as demandas, é necessário obter informações de fluxo em pelo menos um arco de todas as rotas utilizadas. Uma outra observação importante refere-se às informações em arcos de entrada e saída da rede, que, como verificado, contribuem significativamente na melhora dos resultados de estimação, visto que são informações diretas sobre a quantidade de viagens originadas ou destinadas para uma determinada zona.

4.5 ANÁLISE DA VARIABILIDADE DA DEMANDA

Após as etapas de calibração do modelo de estimação do QueensOD e da análise de sensibilidade dos resultados da estimação em relação à qualidade dos

dados de entrada fornecidos, que permitiram um maior conhecimento do ferramental utilizado, foi iniciada a etapa de análise da variabilidade da demanda. O objetivo desta análise foi permitir um maior conhecimento do comportamento da demanda, buscando dar os primeiros passos na utilização direta desse ferramental no gerenciamento do tráfego urbano.

Do mesmo modo que na análise de sensibilidade apresentada no tópico anterior, nas estimações realizadas para avaliar a variabilidade da demanda foi fornecida a matriz OD semente amostral, obtida na pesquisa de placa, e foram utilizados os critérios de erro definidos na etapa de calibração. Como exposto na introdução desse capítulo, a variabilidade da demanda foi avaliada tanto entre períodos diferentes de um mesmo dia, quanto no mesmo período do dia, só que entre dias distintos.

4.5.1 Variabilidade da Demanda ao Longo do Dia

Inicialmente, foi analisada a variabilidade da demanda ao longo do dia. Para tanto, foi estabelecido um horário diferente do período em que foi realizada a pesquisa de placa, que apresentasse um comportamento de deslocamento diferente. Deste modo, optou-se por escolher o horário das 9h00 às 10h00 (entre-pico da manhã). A seguir, na Figura 4.23, são apresentados os dados de fluxo de tráfego para esse horário (durante o dia em que foi realizada a pesquisa de placa). Comparando essa figura com a Figura 3.7, observa-se uma redução considerável no fluxo de tráfego da Rua Pereira Filgueiras, que baixou de cerca 1.000 veíc./hora para aproximadamente 700 veíc./hora. Nas Avenidas Rui Barbosa e Barão de Studart (ambos os sentidos) observou-se uma pequena redução no valor do fluxo, enquanto que na Avenida Santos Dumont e Rua Costa Barros os fluxos de tráfego se mantiveram.

Os resultados da estimação mostraram que, de modo geral, as demandas estimadas para o entre-pico da manhã apresentaram valores ligeiramente inferiores aos das demandas estimadas para o pico da tarde. A seguir, na Figura 4.24, é apresentado o diagrama de dispersão e a reta de regressão desses resultados. Observa-se que neste gráfico foi traçada uma linha tracejada ($y=x$) e que a reta de regressão está abaixo dessa linha, indicando que as demandas estimadas para o entre-pico da manhã tendem a ser inferiores às demandas estimadas para o pico da tarde. Deste modo, a demanda total da matriz OD estimada para o entre-pico foi igual a 9.916 viagens, enquanto que na matriz OD estimada para o pico da tarde esse total

foi igual a 10.369. Essa constatação pode ser justificada pelo fato de os fluxos do tráfego durante o entre-pico terem apresentado valores inferiores aos valores de fluxo durante o pico do tráfego para a maioria das vias da rede simulada.

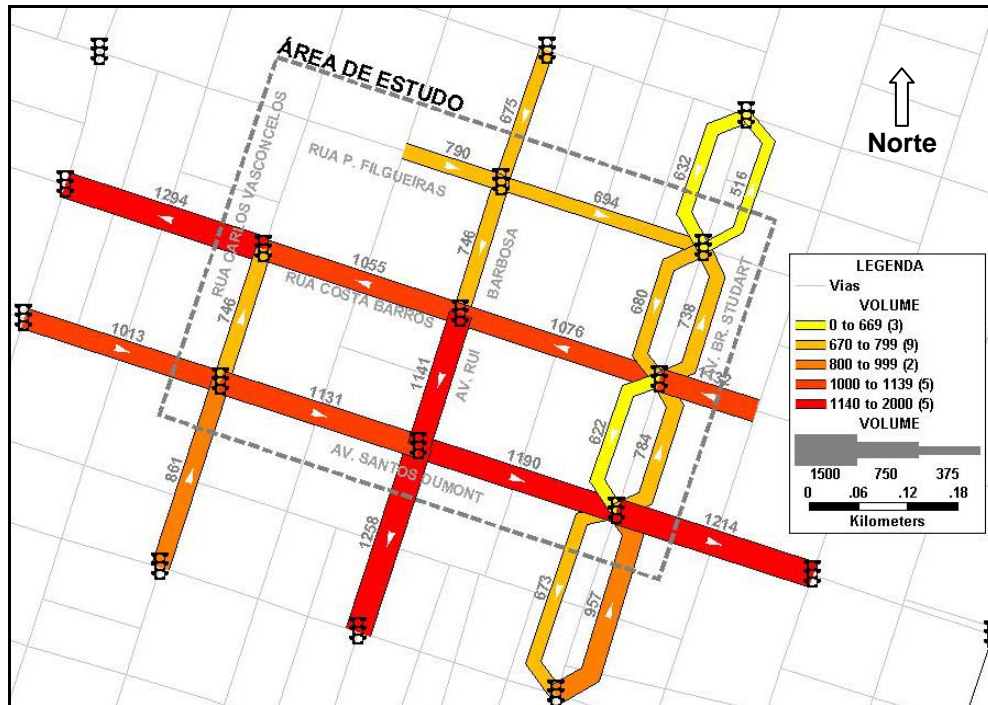


Figura 4.23: Dados de fluxo de tráfego da área do estudo de caso para o entre-pico da manhã

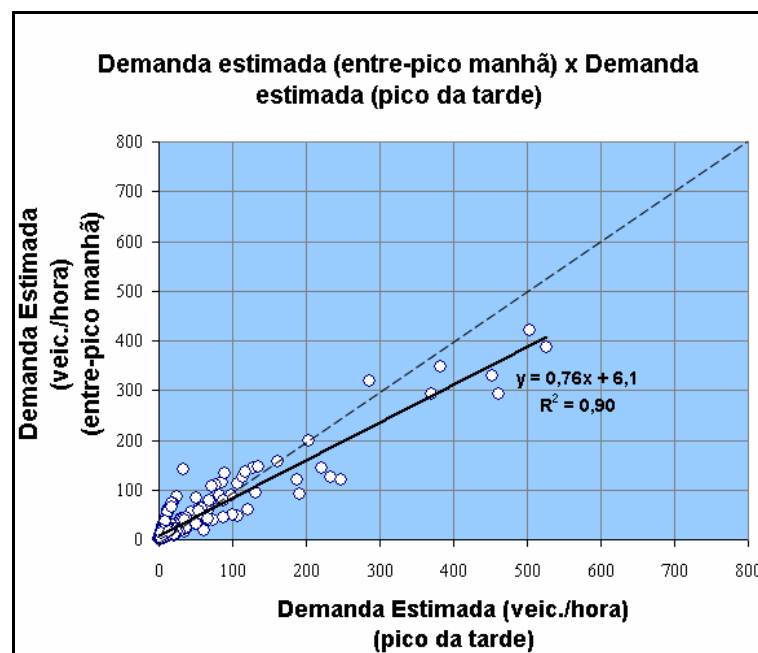


Figura 4.24: Diagrama de dispersão e reta de regressão das demandas estimadas para o pico da tarde e entre-pico da manhã

Analisando esses resultados da estimação, constatou-se que o padrão de deslocamento da matriz OD estimada para o entre-pico é semelhante ao da matriz OD observada para o período da tarde. Neste caso, apesar de a magnitude da demanda estimada ser um pouco menor do que a da demanda observada (em função do menor carregamento de fluxos da rede), verificou-se que ambas possuem a mesma estrutura. Esta constatação foi baseada nos resultados apresentados nas Figuras 4.25, 4.26 e 4.27. Na Figura 4.25, é apresentado o diagrama de dispersão e a reta de regressão das proporções entre demandas estimadas e o total de viagens (T_{ij}/T). Observa-se que os resultados das duas estimações são bastante semelhantes. Essa mesma constatação pode ser feita também analisando os histogramas das Figuras 4.26 e 4.27 e que também são bastante semelhantes. Avaliando apenas as demandas estimadas das zonas internas à área de estudo, que se supõe apresentar ainda uma maior variabilidade do que o conjunto total de demandas, observa-se que os resultados são semelhantes ao apresentado nas figuras seguintes.

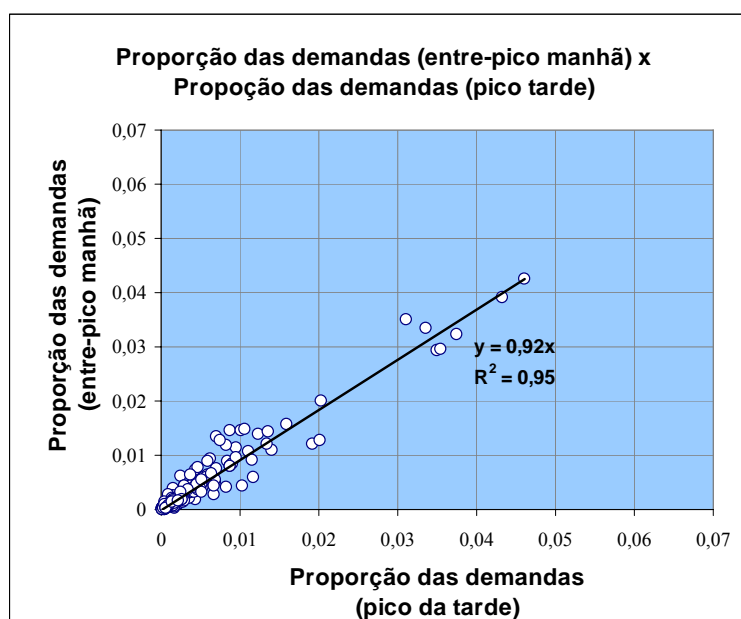


Figura 4.25: Diagrama de dispersão e regressão das proporções das demandas estimadas e do total de viagens para o entre-pico da manhã e pico da tarde

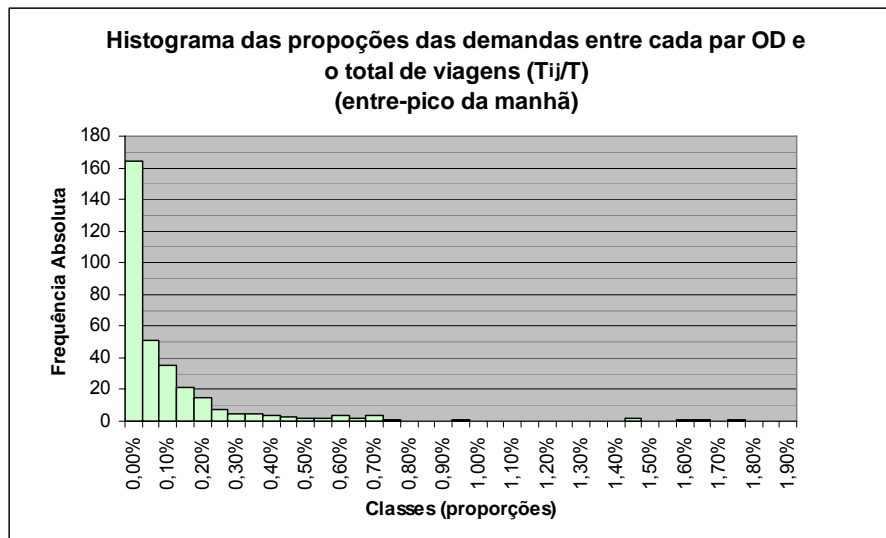


Figura 4.26: Histograma das proporções das demandas estimadas do total de viagens para o entre-pico da manhã

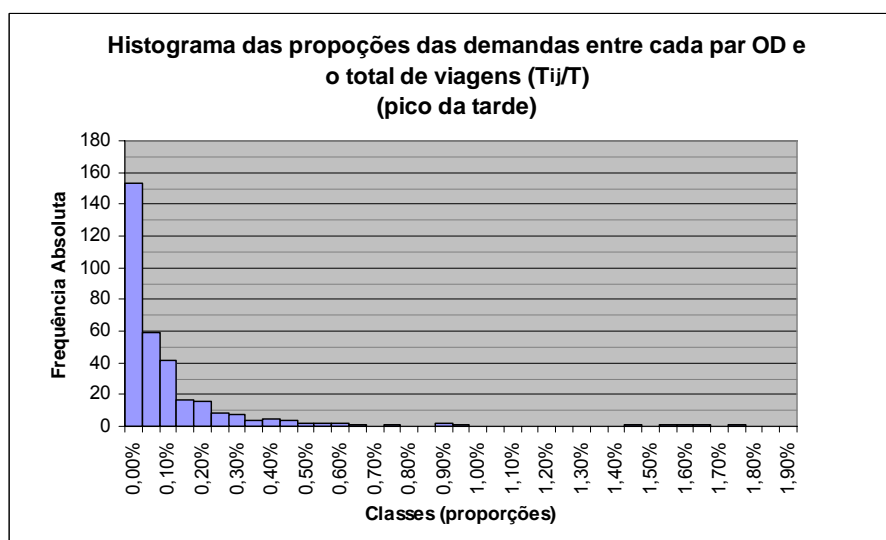


Figura 4.27: Histograma das proporções das demandas estimadas do total de viagens para o pico da tarde

Estes resultados indicam, como apresentado no Capítulo 2, que a utilização de uma matriz OD semente faz com que as proporções de viagens entre as demandas sementes sejam semelhantes às proporções de viagem entre as demandas estimadas, o que não é um resultado satisfatório. No início desse trabalho, esperava-se que o modelo de estimação implementado no QueensOD fosse capaz de representar o processo inverso do que ocorre na realidade, ou seja, que a partir da variabilidade dos fluxos o modelo de estimação representasse a variabilidade das demandas. Entretanto, o que se observa, analisando os resultados até aqui

encontrados, é que o modelo de estimação necessita de uma matriz OD semente de qualidade para estimar as demandas com qualidade e que, por consequência, a utilização dessa matriz OD semente pré-define a estrutura da matriz OD a ser estimada. Deste modo, para a estimação das demandas para diferentes períodos do dia, em que os padrões de deslocamentos sejam significativamente distintos, diferentes matrizes OD amostrais devem ser obtidas diretamente em campo. Vale ressaltar, entretanto, que esta hipótese não é totalmente conclusiva, visto que, para tanto, seria necessário confrontar os resultados de estimação com uma matriz OD observada em campo no período do entre-pico da manhã.

4.5.2 Variabilidade da Demanda ao Longo dos Dias

Após a análise da variabilidade da demanda ao longo do dia, foram realizadas novas análises buscando avaliar a variabilidade das demandas entre os dias da semana. Como apresentado anteriormente, para a estimação dessas matrizes foi definida uma amostra de 41 dias, compreendendo os dias de terça, quarta e quinta-feira dos meses de abril, maio e junho de 2006.

Diante do exposto, foram estimadas 41 matrizes que foram, em seguida, avaliadas quanto à variabilidade da demanda. Analisando os resultados obtidos, verificou-se que a demanda total dessas matrizes estimadas variou entre 9.260 e 10.400 viagens, com valor médio, desvio padrão e coeficiente de variação iguais a 9.900 viagens, 210 viagens e 2,1%, respectivamente. A seguir, na Figura 4.28, é possível perceber a variabilidade da demanda total estimada para os 41 dias de dados de fluxo de tráfego.

Observa-se, por essa figura, que a variação da demanda total foi pequena, reflexo da pequena variação das demandas entre os pares OD. Na Figura 4.29, são apresentadas as variações das demandas de três pares OD, confirmando a baixa variabilidade entre as demandas entre os pares OD. Destaca-se, entretanto, que não se pode afirmar que essa baixa variabilidade nas demandas estimadas é oriunda da baixa variabilidade natural, observada nos dados de fluxo entre o mesmo horário para dias típicos distintos, ou se ela é oriunda da utilização da matriz OD semente amostral, que pré-define a estrutura da matriz OD a ser estimada.

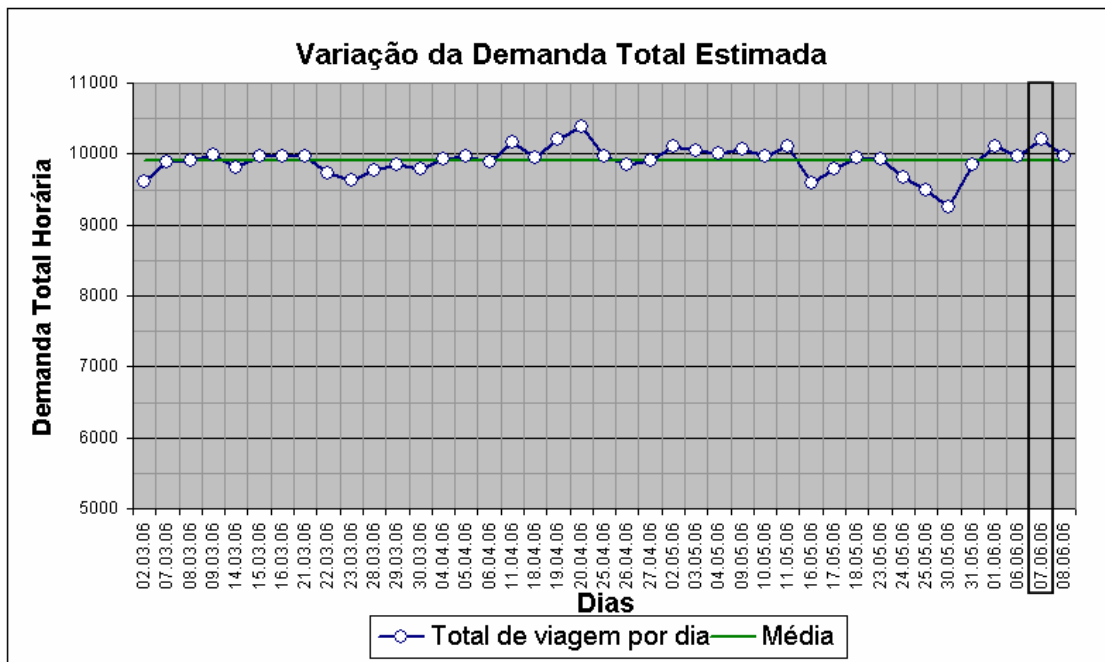


Figura 4.28: Variação da demanda total estimada

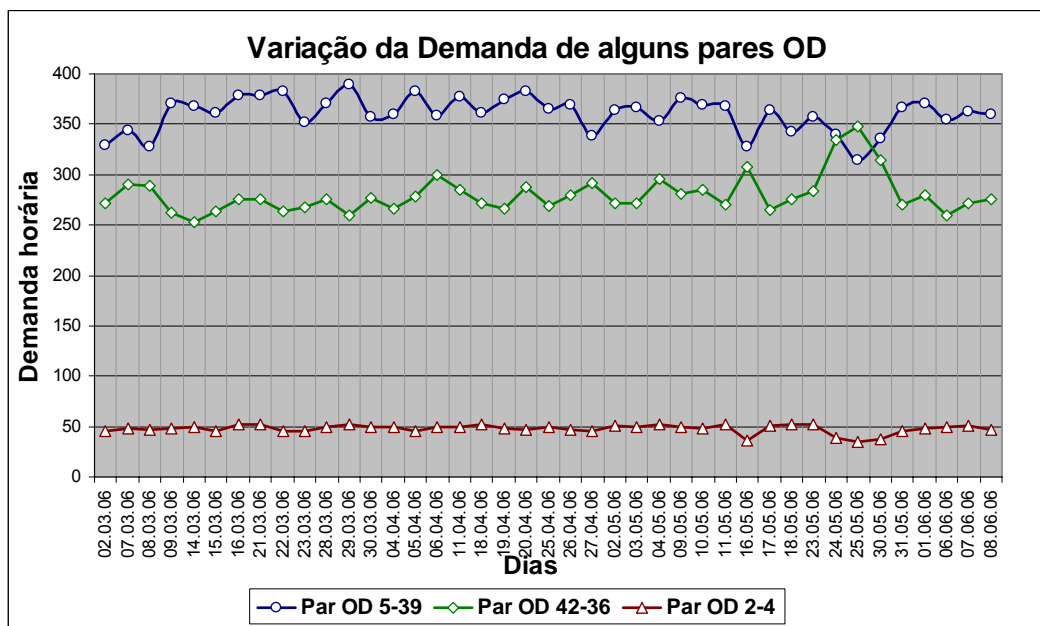


Figura 4.29: Variação da demanda para alguns pares OD

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este estudo descreveu o processo de estimação sintética de matrizes OD a partir de contagens volumétricas, utilizando o aplicativo QueensOD para estimar matrizes OD do transporte individual motorizado na região controlada em tempo real pelo CTAFOR. A partir desse estudo, foi adquirido um maior conhecimento desse ferramental de estimação, que resultou em uma série de conclusões e recomendações que poderão orientar futuros estudos que venham a utilizar esse método no gerenciamento do tráfego urbano na cidade de Fortaleza.

Nos tópicos a seguir, são apresentadas as principais conclusões e recomendações desta pesquisa de dissertação.

5.1 CONCLUSÕES

Para alcançar o principal objetivo deste trabalho, que era estimar matrizes OD com base em contagens volumétricas do fluxo de tráfego do transporte individual motorizado, obtidas a partir do controle em tempo real do tráfego, foi definida uma série de etapas, concebidas na forma de objetivos específicos. A primeira etapa consistiu na realização de uma revisão bibliográfica sobre o assunto, buscando conhecer os principais métodos tradicionais de obtenção de matrizes OD, as particularidades inerentes aos métodos de estimação sintética de matrizes OD e as principais formulações implementadas computacionalmente.

Nesta primeira etapa, foi possível observar a complexidade na aplicação prática dos métodos tradicionais e a sua ineficiência para estimar matrizes OD para o gerenciamento do tráfego urbano, visto o grande dispêndio de recursos financeiros e humanos na sua realização e, principalmente, a impossibilidade de representar o comportamento dinâmico dos deslocamentos realizados. Com relação aos métodos sintéticos de estimação de demandas, verificou-se que eles evoluíram ao longo das últimas quatro décadas, permitindo a estimação de matrizes para situações complexas, como no caso de rede congestionadas, semelhantes à rede controlada em tempo real pelo CTAFOR, e com um caráter dinâmico. Constatou-se, entretanto, como

observado por DEMARCHI e BERTOCINI (2004) que, mesmo assim, esses métodos ainda são poucos utilizados na realidade prática, sendo encontrados mais trabalhos teóricos abordando esse tema. No caso particular da comunidade técnica brasileira, poucas referências foram encontradas. Com relação aos aplicativos analisados, optou-se por utilizar o QueensOD, visto os resultados satisfatórios encontrados na sua aplicação em redes urbanas semaforizadas.

O passo seguinte, buscando atingir o objetivo principal dessa dissertação, foi definir e caracterizar uma área de estudo que fosse representativa da região controlada em tempo real. Deste modo, foi definida uma área de estudo com presença de congestionamento em sua rede viária e com um uso do solo bastante adensado e misto, limitada pelas vias Barão de Studart (a leste), Pereira Filgueiras (ao norte), Carlos Vasconcelos (a oeste) e Santos Dumont (ao sul).

A caracterização dessa área de estudo mostrou que as vias apresentam características funcionais distintas da definida na legislação de uso e ocupação do solo vigente para a cidade de Fortaleza, reflexo de uma hierarquia mal definida que faz com que os deslocamentos realizados, que deveriam ocorrer no conjunto das vias arteriais, utilizem as vias coletoras e locais. Exemplos disso são vias como as Ruas Carlos Vasconcelos e Pereira Filgueiras, que perderam a funcionalidade de vias locais, de acordo com a legislação, e já absorvem grande parte do tráfego de passagem. Avaliando ainda as características operacionais das vias da área de estudo, observou-se um maior fluxo de tráfego nas vias de sentido leste/oeste e oeste/leste, evidenciando a importância desses corredores nos deslocamentos realizados na região.

Como exposto, dentro da etapa de caracterização da área de estudo foi realizada ainda a coleta das demandas de deslocamento, a partir do método tradicional de pesquisa de leitura de placa. Observou-se nessas demandas de deslocamento, que foram fundamentais na etapa de avaliação da eficiência do modelo de estimação do QueensOD, um predomínio de viagens utilizando a área de estudo apenas como passagem e poucas viagens entre as zonas internas a essa área. De um total de cerca de 11.000 viagens observadas na matriz OD, aproximadamente 4.700 apenas passaram pela área de estudo, reflexo da pequena extensão dessa área.

Realizada a etapa de caracterização, foi iniciado o processo de estimação de matrizes OD com o auxílio do QueensOD. Inicialmente, foi necessário realizar a

calibração do modelo de estimação implementado nesse aplicativo, quanto aos critérios de erro utilizados. Os resultados dessa calibração indicaram que a definição de qual critério de erro deve ser utilizado para avaliar as diferenças entre os fluxos estimados e observados é irrelevante para o caso da rede da área de estudo. Constatou-se que, variando o critério de erro utilizado, não era possível observar variações significativas nos resultados da estimação. Esta constatação pode ser explicada pelo fato de o modelo de alocação ter conseguido representar bem as escolhas de rotas, visto que os resultados da estimação dos fluxos para todas as simulações realizadas apresentaram um erro médio absoluto próximo de zero.

Com relação à calibração do critério de erro para avaliar as diferenças entre as demandas, foi possível confirmar a recomendação feita por *DERMACHI et al.* (2004) quanto à utilização do erro relativo. Destaca-se, entretanto, que no caso em que é fornecida uma matriz OD semente constante, a definição deste critério também se torna irrelevante, visto que o modelo de estimação implementado no *QueensOD* passa a desconsiderar esse erro em seu processo de estimação. Vale mencionar que a recomendação de *DEMARCHI et al.* (2004) se referiu a situações nas quais se utiliza uma matriz OD semente amostral.

Realizada a calibração do modelo de estimação, iniciou-se a etapa de análise de sensibilidade dos resultados da estimação frente à variação da qualidade dos dados de entrada. Inicialmente, essa análise foi feita em função da matriz OD semente fornecida. Estes resultados mostraram que o fornecimento de uma matriz semente constante, mesmo com uma grande quantidade de arcos com dados de fluxos, não permite o modelo estimar uma matriz adequada. Cabe aqui uma crítica à utilização da teoria da maximização da entropia. Neste caso, observa-se que, apesar de a matriz OD estimada ser a matriz com maior entropia, ela não será necessariamente a matriz observada em campo, ou seja, essa teoria pode não representar adequadamente o comportamento de deslocamentos da população. Deste modo, não há nenhuma garantia de que a matriz OD estimada, quando não é fornecida uma matriz OD semente de qualidade, será a matriz OD que ocorrerá realmente em campo, como observado nos resultados da estimação. Entretanto, os resultados encontrados mostraram que, fornecendo uma matriz OD amostral, o modelo de estimação é capaz de expandir essa matriz, com erros bastante pequenos entre as demandas estimadas e observadas.

Analisando ainda os resultados de estimação deste teste, verificou-se que, quando foi fornecida uma matriz OD semente binária, observou-se que o modelo de estimação do QueensOD manteve algumas demandas com valor igual a 1. Analisando com mais detalhes os pares OD dessas demandas, observou-se que não havia nenhuma informação de fluxos de tráfego na rotas utilizadas, indicando que o modelo de estimação do QueensOD não considera, no processo de estimação, os pares OD que não possuem informação de fluxo de tráfego nas rotas que interligam essas zonas.

A outra análise de sensibilidade consistiu em avaliar os resultados da estimação para cenários distintos quanto à quantidade de informações de fluxo utilizadas. Além do cenário em que foram utilizadas as informações de todos os laços de detecção, foram definidos mais outros dois cenários, um complementando esse conjunto de informações de fluxo e outro retirando algumas informações desse conjunto.

No cenário em que o conjunto de dados foi complementado, foram coletadas informações em arcos que pertencessem às rotas que antes não possuíam nenhuma informação de fluxo. Os resultados da estimação para este cenário mostraram que, de modo geral, houve uma pequena melhora na qualidade das demandas estimadas. Entretanto, avaliando isoladamente as demandas diretamente beneficiadas pela coleta dessas informações, foram observados ganhos significativos, justificando a coleta de informações adicionais para estimativas futuras de matrizes OD.

No cenário em que foram retiradas informações de fluxo, de modo geral, observou-se uma pequena redução na qualidade da estimação. Entretanto, para algumas demandas, essa redução foi mais significativa, como no caso das demandas originadas na Rua Costa Barros (zona 24). A justificativa para uma diferença significativa nos resultados de estimação dessa demanda está no fato de que o arco que teve a informação de fluxo retirada era um arco de saída da zona e, portanto, informava ao modelo de estimação a quantidade total de viagens originadas nessa zona. Após a retirada dessa informação de fluxo, o modelo deixou de possuir essa informação, estimando com menos qualidade as demandas originadas nessa zona. As conclusões desta análise mostraram a relevância em obter informação de fluxo em, pelo menos, um arco entre todas as rotas utilizadas, e também que informações de fluxos em arco de saída e entrada das zonas são mais importantes, pois fornecem informações diretas sobre a quantidade de informações originadas ou destinadas.

Quanto à análise de variabilidade da demanda, observou-se, no caso da variabilidade ao longo do dia, que as demandas estimadas para o entre-pico da manhã apresentaram valores ligeiramente inferiores aos das demandas estimadas para o pico da tarde e que essa constatação pode ser explicada pelo fato da magnitude dos dados de fluxo durante o entre-pico serem inferiores. Analisando o resultado deste teste de sensibilidade, verificou-se ainda que o padrão de deslocamento das matrizes estimadas era bastante semelhante, indicando que a utilização de uma matriz OD semente faz com que as proporções de viagens entre as demandas sementes sejam semelhantes às proporções de viagem entre as demandas estimadas, o que não é um resultado satisfatório. A partir dos resultados encontrados, conclui-se que, para estimar as demandas para diversos horários do dia, com qualidade, as informações fornecidas pelo controle de tráfego em tempo real realizado pelo CTAFOR, sozinhas, não são suficientes, visto que o modelo necessita de uma matriz OD semente de qualidade, pelo menos amostral, para diferentes períodos do dia.

Na análise de variabilidade das demandas ao longo dos dias, observou-se que as demandas apresentaram uma pequena variabilidade, entretanto não se pode afirmar qual é o causador dessa baixa variabilidade, ou seja, não se pode afirmar se ela é ocasionada pela baixa variabilidade dos dados de fluxo ou se é devido à utilização da matriz OD semente amostral que pré-define a estrutura da matriz OD a ser estimada.

5.2 RECOMENDAÇÕES

Nesta pesquisa de dissertação não foram esgotadas todas as discussões sobre a estimação sintética de matrizes OD, principalmente quanto às questões relacionadas com a variabilidade das demandas que, como observado, não foram muito conclusivas. Deste modo, sugere-se algumas recomendações para trabalhos futuros:

- a. Avaliar os resultados do modelo de estimação do QueensOD para uma rede mais complexa do que a utilizada nesta pesquisa, em que os efeitos de congestionamento sejam mais evidentes e que, conseqüentemente, o modelo de alocação do tráfego tenha mais dificuldades em estimar as rotas utilizadas;

- b. Verificar, com mais detalhes, a correlação entre a quantidade de informações de fluxos de tráfego nos arcos das rotas e a qualidade da estimação das demandas;
- c. Identificar e implantar algum método eficiente na coleta de matrizes OD amostrais que permita, associado às vantagens em possuir uma central de controle do tráfego em tempo real, estimar matrizes OD para diferentes períodos e, conseqüentemente, avaliar a variabilidade da demanda;
- d. Por fim, recomenda-se avaliar os efeitos da variabilidade da demanda no tráfego, principalmente nos horários de pico do tráfego, quando as vias operam próximo da capacidade, em que pequenas alterações nas demandas podem causar impactos significativos na qualidade do tráfego.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAHAMSSOM, T. (1998) *Estimation of Origin-Destination Matrices Using Traffic Counts - A Literature Survey*. International Institute for Applied Systems Analysis, Interim Report IR- 98-021, Austria.
- ANTP (1997) *Transporte Humano - Cidade com Qualidade de Vida*. Associação Nacional de Transporte Público. São Paulo, 312p.
- ARRUDA, F. S. DE; SILVA, A. N. R. DA (2004) Diários de Atividades: Uma Metodologia Alternativa de Coleta de Dados para Planejamento de Transportes. *Anais do XVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, Florianópolis. Vol I, pPg 675 – 686.
- ASHOK, K. (1996) *Estimation and Prediction of Time-Dependent Origin-Destination Flows*. Ph.D. Dissertation, MIT, Cambridge, Massachusetts, USA.
- BELL, M. G. H. (1991) The estimation of origin-destination matrices by constrained generalized least squares. *Transportation Research Part B*, n. 25, p. 13-22.
- BERTONCINI, B.V. (2007) *Uma Proposta de Carregamento Incremental de Fluxos Veiculares para a Estimação de Matriz O-D Sintética*. Dissertação de Mestrado, EESC/USP.
- BRILLOUIN, L. (1956) *Science and Information Theory*. Academic Press, New York
- CALIPER (2002) *Travel Demand Modeling With TransCAD 4.5*. Caliper Corporation, USA.
- CASCETTA, E. (1984) Estimation of Trip Matrices from Traffic Counts and Survey Data: a Generalized Least Squares Estimator. *Transportation Research* 16B, n.4-5, p.89- 299.
- DEMARCHI, S. H. E BERTOCINI, B. V. (2004) Determinação de Matrizes O-D Sintéticas a partir de Contagens Volumétricas. *Anais do XVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, Florianópolis.
- DEMARCHI, S. H.; BERTONCINI, B. V. E LIMA, E. P. (2004) Estimativa de Demandas Sintéticas para a Região Central de Maringá Utilizando o QueensOD. *Anais do XVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, Florianópolis.
- DIXON, M.D.; RILETT, L.R. (2002) Real-time OD Estimation Using Automatic Vehicle Identification and Traffic Count Data. *International Journal of Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, v.17, p. 17-21
- DIXON, M.D.; RILETT, L.R. (2005) Population Origin Destination Estimation Using Automatic Vehicle Identification and Volume Data. *ASCE Journal of Transportation Engineering*, v.131, n.2, p. 75-82.
- FISK C. S. (1988) On Combining Maximum Entropy Trip Matrix Estimation with User Optimal Assigment. *Transport Research*, 22B.

- GUENSLER R. E WOLF J. (1999) Development of a Handheld Electronic Travel Diary for Monitoring Individual Trip making Behavior. *Transportation Research Board*. The 78th Annual Meeting, Washington, DC, USA
- GUR Y.J.; TURNQUIST, M.; SCHNEIDER, M; LEBLANC, L.; KURTH, D. (1980) *Estimation of an Origin- Destination Trip Table based on Observed Link Volumes and Turning Movements*. Technical Report RD-801034, FHWA, U.S. Department of Transportation, Washington, DC.
- HELLINGA, B.R. (1994) *Estimating Dynamic Origin - Destination Demands from Link and Probe Counts*. Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada.
- HOGBERG, P. (1976). Estimation of parameters in models for traffic prediction: a non-linear approach. *Transportation Research Part B*, n 10, pp. 263-265.
- HOLM, J. et al. (1976). Calibrating traffic models on traffic census results only. *Traffic Engineering and Control*, n 17, pp. 137-140.
- IBGE (2006) www.ibge.gov.br, acesso 20 de agosto de 2006.
- LÓPEZ-REYES, D. E. L.; KAWAMOTO, E. (2001) A Influência da Segmentação da Estimção da Matriz Origem-Destino, Baseada em um Modelo de Escolha Discreta. In: Carlos Nassi, Anísio Brasileiro, Eiji Kawamoto, Luis Antonio Lindau. (Org.). *Transportes: Experiências em Rede*. 1 ed. Rio de Janeiro: FINEP, 2001, v. 1, p. 143-173
- KIM, J.; LEE, S. (2005) Dynamic Travel Demand Estimation Using Real-Time Traffic Data. *Advanced OR and AI Methods, TRANSPORTATION*. pp.237-241.
- LIDAS (2007) www.lidas.org.br/upp/metro/pesquisa.htm, acesso em 10 maio de 2007.
- LIN, P. (2006) *Robust Model for Estimating Freeway Dynamic Origin-Destination Matrices*. Ph.D. Dissertation, University of Maryland, College Park, USA.
- LOUREIRO, C. F. G., PAULA, F. S. M., SOUZA, D. D. DE M. R., MAIA, F. V. B. (2004) Avaliação da Qualidade do Tráfego nas Vias Arteriais de Fortaleza utilizando o Highway Capacity Manual 2000. *Anais do XVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, Florianópolis SC, Comunicações Técnicas.
- LOUREIRO, C. F. G.; LEANDRO, C. H. P. E OLIVEIRA, M. V. T. (2002) Sistema Centralizado de Controle de Tráfego de Fortaleza: ITS Aplicado à Gestão Dinâmica do Trânsito Urbano. *Anais do XVI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, Natal.
- M. VAN AERDE & ASSOC.,LTD. (2002a) *QueensOD Release 2.10 User's Guide: Estimating Origin Destination Traffic Demands from Links Flow*. M. Van Aerde & Assoc.,Ltd, Ontario, Canada.
- M. VAN AERDE & ASSOC.,LTD. (2002b) *Integration Release 2.30 for Windows: User's Guide – Volume I: Fundamental Model Features*. M. Van Aerde & Assoc.,Ltd, Ontario, Canada.

- MENESES, H. B. (2003) *Interface Lógica em Ambiente SIG para Bases de Dados de Sistemas Centralizados de Controle de Tráfego Urbano em Tempo Real*. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará.
- MONTGOMERY, D. C. E RUNGER, G. C. (2003) *Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros*. 2a Ed. LTC, Rio de Janeiro.
- NGUYEN, S. (1977) *Estimating an OD Matrix from Network Data: A Network Equilibrium Approach*. Publication 87. Centre de Recherche sur les Transports, Université de Montreal.
- NIELSEN, O. A. (1993) *A New Method for Estimating Trip Matrices from Traffic Counts*. Institute of Roads, Traffic, and Town Planning. The Technical University of Denmark, Paper 1993-3.
- NIELSEN, O. A. (1998) Two New Methods for Estimating Trip Matrices from Traffic Counts. In: *Travel Behaviour Research: Updating the State of Play*. Ed. Elsevier.
- OHMORI, N.; NAKAZATO, M.; HARATA, N.; SASAKI K. E NISHII, K. (2006) Activity Diary Surveys Using GPS Mobile Phones and PDA. *Transportation Research Board*. The 85th Annual Meeting, Washington, DC, USA.
- OLIVEIRA, M. V. T. (2004). *A Natureza dos Padrões de Variação Espaço-Temporal do Volume Veicular em Ambiente Urbano: Estudo de Caso em Fortaleza*. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.
- ORTÚZAR, J. DE D. E WILLUNSEN, L. G. (1994) *Modelling Transport*. Jonh Wiley & Sons, Chichester.
- PARAMAHAMSAN, H. (1999) *Fundamental Properties of Synthetic O-D Generation Formulations and Solutions*. M.Sc. Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA.
- PAULA, F. S. M.; OLIVEIRA, M. V. T. DE; SOUZA, D. D. DE M. R. E LOUREIRO, C. F. G. (2005) Avaliação do Nível de Serviço e do Momento de Tráfego nas Vias Arteriais de Fortaleza. *Anais do 15º Congresso Brasileiro de Trânsito e Transportes*, ANTP, Goiânia, GO, Comunicações Técnicas.
- PMF (1996) *Lei nº 7.987 de Uso e Ocupação do Solo do Município de Fortaleza*. Instituto de Planejamento do Município. Prefeitura Municipal de Fortaleza, Fortaleza/CE.
- RAKHA, H.; PARAMAHAMSAN, H.; VAN AERDE, M. (1998a) Static Synthetic O-D Estimation Formulations, Assumptions and Limitations. *Transportation Research Board*. The 77th Annual Meeting, Washington, DC, USA.
- RAKHA, H.; VAN AERDE, M.; BLOOMBERG, L.; HUANG, X. (1998b) Construction and Calibration of a Large-Scale Microsimulation Model of the Salt Lake Area. *Transportation Research Record* 1644, p. 93-102.

- ROBILLARD, P. (1975) Estimating the O-D Matrix from Observed Link Volumes. *Transportation Research Part B*, n.9, p.123-128.
- SPIESS, H. (1987) A Maximum Likelihood Model for Estimating Origin-Destination Matrices. *Transportation Research Part B*, n. 21, pp 395-412.
- TAMIN, O. Z.; WILLUMSEN, L. G. (1989) Transport Demand Model Estimation from Traffic Counts. *Transportation*, n.16(1), p. 3-26.
- TRL (2000) *Executive Summary – Description of SCOOT*. *SCOOT Traffic Handbook, SCOOT 0414*. Transportation Research Laboratory.
- TSEKERIS, T.; STATHOPOULOS, A. (2003) Real-Time Dynamic Origin-Destination Matrix Adjustment with Simulated and Actual Links Flows in Urban Networks. *Transportation Research Record*, 1857, p. 117-127.
- TURNQUIST, M. E GUR Y. (1979) Estimations of Trip Table from Observed Link Volumes. *Transportation Research Record* 730, p 1 - 6.
- VAN AERDE, M.; RAKHA, H. E PARAMAHAMSAN, H. (2003) Estimation of OD matrices: the Relationship between Practical and Theoretical Considerations. *Transportation Research Board*. The 82nd Annual Meeting, Washington, DC, USA.
- VAN DE ZIJPP, N. (1997) Dynamic OD-Matrix Estimation from Traffic Counts and Automated Vehicle Identification Data. *Transport Research Board* 1607.
- VAN VLIET, D.; HALL, M. (1998) *SATURN version 9.4: user's manual*. Institute for Transport Studies. University of Leeds. England.
- VAN ZUYLEN, H. (1978). The information minimizing method: validity and applicability to transport planning. In: G. R. M. Jansen (eds) *New Developments in Modeling Travel Demand and Urban Systems*. Saxon, Farnborough.
- VAN ZUYLEN, H. E WILLUMSSEN L. G. (1980) The Most Likely Trip Matrix Estimated from Traffic Counts. *Transportation Research*, 14B.
- VANAJAKSHI, L.; RILETT, L.R. (2006) System Wide Data Quality Control of Inductance Loop Data Using Non Linear Optimization. *ASCE Journal of Computing in Civil Engineering*, v.20, n.3, p. 187-196.
- WIKIPÉDIA (2007) www.wikipedia.com, acesso em 09 junho de 2007.
- WILLS, M. J. (1986) A Flexible Gravity-Opportunities Model for Trip Distribution. *Transportation Research* 20B(2): 89-111.
- WILLUMSSEN, L. G. (1978) *Estimation of an O-D Matrix from Traffic Counts: A review*. Institute for Transport Studies, Working paper no. 99, Leeds University.
- WILLUMSSEN, L. G. (1984) Estimating Time- Dependent Trip Matrices from Traffic Counts. *Ninth International Symposium on Transportation and Traffic Theory*.
- WILSON, A. G. (1970) *Entropy in Urban and Regional Modelling*. Pion, London, England.

- YANG, H. (1995) Heuristic algorithms for the bilevel origin-destination matrix estimation problem. *Transportation Research Part B*, n 29, p. 231-242.
- YANG, H.; Sasaki, T.; Iida, Y.; Asakura, Y. (1992). Estimation of Origin-Destination Matrices from Link Traffic Counts on Congested Networks. *Transportation Research Part B*, n 26, p. 417- 434.

ANEXOS

- MATRIZ EXPANDIDA

		DESTINOS																														TOTAL			
		1	2	4	6	7	8	10	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	36		38	39	41
ORIGENS	2			41	11	20	36	4	200			5		7			5		5		4	7								14		75		434	
	3	5		32			16		27	10	17							6		4							4			5	28	15	4	173	
	4				87		7		25			51																				12	4	186	
	5	9			26	4	4	14	33			29		4		14		4		34		4	115		5			5	10	36		368		718	
	6					4	22	5	25					4						5													11	76	
	8							23	72					4	4										4								11	118	
	9								18	10			20	38		30		14	11	83					44							27	348	643	
	11	177	83	15	22	13	88	35	262		5	14				9		4		7			38		13				7	8	32	18	135	29	1014
	13	61	13		8	5	4		28											12			7								5	17		160	
	14	9					3									8				46								3	4		33			106	
	15								4								4			15			30	9					5	21		76		164	
	16					46	13		25					4											5									93	
	17					9		5					4						19	10					14							6	61	128	
	18							72	32																										104
	19																			91															91
	20								4	4						23				86		8										9			134
	21	4							4							4	32			21		4	19					4				35		127	
	22						4		4				9			5	4			11											6	20		63	
	24	19				14	9	38	13	10			14	5	41	132	5	14	73	422		4	28	14	57		4	10	16	6		93	98	1139	
	25	9						5	4	27										49											5	5		104	
	26								3																		4			4	22			33	
	27																			6				19						28	30	29	362	4	478
28	4				16	18	14	46				52			4	4	15		35			29				4	4		10	4	49		308		
29																																115		115	
30							38	69						108																				215	
31							8	10															3				16	7	25	45	8	13		135	
32								11																	11			41	36	62		45		206	
33							4																11						32	18		5		70	
34																									9							105		10	124
35	66	3		6	6		38	3	20			3	3	8			2		38	24		5	18			79	45	41	62	375	39	104	22	1010	
37	261			4		21	17	21	43	4	10	4		4				4	128	166	3	4	11			62	26	21	16	45	14	44	7	940	
40					59	15	5	22				46		4		4	4		25				74	5					54	31		11	12	371	
42							468	139						91											109									1196	
TOTAL	624	99	88	164	196	260	793	1104	124	26	109	156	69	256	229	58	61	103	1135	190	31	282	159	147	129	141	103	171	298	1238	180	1517	736	10976	

ANEXO II

ARQUIVOS DE ENTRADA DO QUEENSDO

- Arquivo de nós

Linha<1>	ARQUIVO DE NÓS – ÁREA DE ESTUDO					
Linha <2>	82	1	1			
Linha <3>	1	0,515	0,891	2	0	0
Linha <4>	2	0,560	0,820	1	0	0
Linha <5>	3	0,634	0,853	3	0	0
Linha <6>	4	0,684	0,780	1	0	0
Linha <7>	5	0,751	0,815	3	0	0
Linha <8>	6	0,795	0,744	1	0	0
Linha <9>	7	0,868	0,777	2	0	0
Linha <10>	8	0,910	0,707	1	0	0
Linha <11>	9	0,990	0,738	3	0	0
Linha <12>	10	0,990	0,738	2	0	0
Linha <13>	11	0,426	0,828	3	0	0
Linha <14>	12	1,026	0,634	2	0	0
Linha <15>	13	0,494	0,716	1	0	0
Linha <16>	14	0,615	0,684	1	0	0
Linha <17>	15	0,730	0,642	1	0	0
Linha <18>	16	0,848	0,606	1	0	0
Linha <19>	17	0,906	0,588	1	0	0
Linha <20>	18	0,970	0,567	1	0	0
Linha <21>	19	0,510	0,662	1	0	0
Linha <22>	20	0,631	0,623	1	0	0
Linha <23>	21	0,745	0,586	1	0	0
Linha <24>	22	0,866	0,547	1	0	0
Linha <25>	23	0,375	0,670	2	0	0
Linha <26>	24	0,975	0,477	3	0	0
Linha <27>	25	0,442	0,553	1	0	0
Linha <28>	26	0,560	0,515	1	0	0
Linha <29>	27	0,677	0,477	1	0	0
Linha <30>	28	0,794	0,439	1	0	0
Linha <31>	29	0,852	0,421	1	0	0
Linha <32>	30	0,916	0,400	1	0	0
Linha <33>	31	0,458	0,505	1	0	0
Linha <34>	32	0,579	0,466	1	0	0
Linha <35>	33	0,699	0,427	1	0	0
Linha <36>	34	0,809	0,391	1	0	0
Linha <37>	35	0,324	0,513	3	0	0
Linha <38>	36	0,924	0,318	2	0	0
Linha <39>	37	0,365	0,426	3	0	0
Linha <40>	38	0,486	0,386	2	0	0

Linha <41>	39	0,600	0,350	2	0	0
Linha <42>	40	0,718	0,312	3	0	0
Linha <43>	41	0,839	0,272	2	0	0
(cont.)						
Linha <44>	42	0,839	0,272	3	0	0
Linha <45>	43	0,488	0,807	4	0	0
Linha <46>	44	0,550	0,787	4	0	0
Linha <47>	45	0,607	0,769	4	0	0
Linha <48>	46	0,673	0,748	4	0	0
Linha <49>	47	0,724	0,731	4	0	0
Linha <50>	48	0,784	0,712	4	0	0
Linha <51>	49	0,841	0,693	4	0	0
Linha <52>	50	0,899	0,675	4	0	0
Linha <53>	51	0,963	0,654	4	0	0
Linha <54>	52	0,462	0,726	4	0	0
Linha <55>	53	0,583	0,695	4	0	0
Linha <56>	54	0,698	0,653	4	0	0
Linha <57>	55	0,816	0,616	4	0	0
Linha <58>	56	0,938	0,578	4	0	0
Linha <59>	57	0,437	0,649	4	0	0
Linha <60>	58	0,499	0,629	4	0	0
Linha <61>	59	0,556	0,611	4	0	0
Linha <62>	60	0,621	0,590	4	0	0
Linha <63>	61	0,673	0,574	4	0	0
Linha <64>	62	0,735	0,554	4	0	0
Linha <65>	63	0,790	0,536	4	0	0
Linha <66>	64	0,855	0,515	4	0	0
Linha <67>	65	0,912	0,497	4	0	0
Linha <68>	66	0,409	0,563	4	0	0
Linha <69>	67	0,528	0,525	4	0	0
Linha <70>	68	0,645	0,487	4	0	0
Linha <71>	69	0,762	0,449	4	0	0
Linha <72>	70	0,884	0,410	4	0	0
Linha <73>	71	0,386	0,492	4	0	0
Linha <74>	72	0,448	0,473	4	0	0
Linha <75>	73	0,505	0,454	4	0	0
Linha <76>	74	0,569	0,433	4	0	0
Linha <77>	75	0,622	0,416	4	0	0
Linha <78>	76	0,688	0,395	4	0	0
Linha <79>	77	0,739	0,378	4	0	0
Linha <80>	78	0,799	0,359	4	0	0
Linha <81>	79	0,861	0,339	4	0	0
Linha <82>	80	0,252	0,885	4	0	0
Linha <83>	81	0,271	0,948	3	0	0
	82	0,191	0,903	3	0	0

Descrição

Linha <1> Título do arquivo

Linha <2> Primeira coluna: quantidade de nós; segunda e terceira: não utilizado pelo QueenOD, mas deve constar no arquivo,

Linha <3+n> Primeira Coluna: ID do nó, segunda: coordenada "X" do nó; terceira: coordenada "Y do nó"; quarta: tipo de nó (1-origem/destino, 2-destino, 3-origem ou 4-intermediário); quinta e sexta: não utilizada pelo QueensOD, mas deve constar.

(Cont.)

Linha <111>	109	37	71	0,070	60	1800	2	0	0	0	0	0	0	0	0	6	3	0	0	0
Linha <112>	110	73	38	0,071	60	1650	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Linha <113>	111	75	39	0,070	60	1400	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Linha <114>	112	40	77	0,070	60	1650	2	0	0	0	0	0	0	0	0	10001	0	0	0	0

Descrição**Linha <1>** Título do arquivo**Linha <2>** Primeira coluna: quantidade de arcos; demais colunas: não utilizado pelo QueenOD, mas deve constar no arquivo,**Linha <3+n>** Primeira Coluna: ID do arco, segunda: nó inicial do arco; terceira: nó final do arco; quarta: comprimento do arco(m); quinta: velocidade de fluxo livre (km/h) - negativo se for conector; sexta: capacidade (veic/hora/faixa); sétima: número de faixa; oitava, nona e décima: não utilizado pelo QueenOD, mas deve constar no arquivo; décima primeira: movimento proibido; décima segunda, terceira, quarta, quinta: não utilizado pelo QueenOD, mas deve constar no arquivo; décima sexta: tipo de controle (10001 – placa “PARE”, 10002 – placa “DÊ A PREFERÊNCIA” ou ID do semáforo definido no arquivo de semáforo); décima sétima: primeira fase com verde para o arco; décima oitava: segunda fase com verde para o arco; décima oitava e nona: não utilizado pelo QueenOD, mas deve constar no arquivo.

- Arquivo de semáforos

Linha <1>	ARQUIVOS DE SEMÁFOROS: ÁREA DE ESTUDO										
Linha <2>	8	1	3600								
Linha <3>	1										
Linha <4>	1	104	104	104	38	2	62	5	32	5	104
Linha <5>	2	104	104	104	43	2	47	5	47	5	104
Linha <6>	3	104	104	104	88	2	61	5	33	5	104
Linha <7>	4	104	104	104	19	2	43	5	51	5	104
Linha <8>	5	104	104	104	48	2	45	5	49	5	104
Linha <9>	6	104	104	104	99	2	51	5	43	5	104
Linha <10>	7	104	104	104	84	2	52	5	42	5	104
Linha <11>	8	104	104	104	86	2	52	5	42	5	104

Descrição

Linha <1> Título do arquivo

Linha <2> Primeira coluna: quantidade de semáforos; segunda: quantidade de planos semaforicos; terceira: duração de cada plano (s)

Linha <3> Número do plano

Linha <4+n> Primeira Coluna: ID do semáforo, segunda: ciclo inicial (s); terceira: ciclo mínimo se a lógica de otimização estiver ativada (s); quarta: ciclo máximo se a lógica de otimização estiver ativada (s); quinta: defasagem (s); sexta: quantidade de estágios; sétima: verde do estágio 1 (s); oitava: entreverde do estágio 1 (s); nona: verde do estágio 2 (s); décima: entreverde do estágio 2 (s); décima primeira: frequência de otimização e coordenação dos semáforos.

- Arquivo de fluxos

Linha <1>	DADOS DE FLUXO (07/06/06)				
Linha <2>	1	3600	114	114	
Linha <3>	3600	1			
Linha <4>	1	0	3000	5,3	0
Linha <5>	2	0	3600	2,0	0
Linha <6>	3	0	3600	2,0	0
Linha <7>	4	0	3390	5,3	0
Linha <8>	5	0	3600	2,0	0
Linha <9>	6	0	3600	2,0	0
Linha <10>	7	652	4200	5,3	17
Linha <11>	8	0	3600	2,0	0
Linha <12>	9	0	3600	2,0	0
Linha <13>	10	0	3390	5,3	0
Linha <14>	11	0	3600	2,0	0
Linha <15>	12	0	3600	2,0	0
Linha <16>	13	697	3300	5,3	14
Linha <17>	14	774	3300	5,3	10
Linha <18>	15	0	3300	4,0	0
Linha <19>	16	0	3300	3,9	0
Linha <20>	17	0	3300	3,5	0
Linha <21>	18	1177	3300	4,2	16
Linha <22>	19	0	3300	3,2	0
Linha <23>	20	0	2800	3,8	0
Linha <24>	21	0	2800	3,5	0
Linha <25>	22	1023	2800	3,7	15
Linha <26>	23	0	2800	4,0	0
Linha <27>	24	0	3300	4,0	0
Linha <28>	25	0	2200	5,1	0
Linha <29>	26	0	3300	4,7	0
Linha <30>	27	797	4200	5,0	17
Linha <31>	28	0	3300	4,9	0
Linha <32>	29	723	3300	4,8	16
Linha <33>	30	0	3300	4,8	0
Linha <34>	31	0	1650	2,0	0
Linha <35>	32	0	1650	2,0	0
Linha <36>	33	0	1650	2,0	0
Linha <37>	34	0	1650	2,0	0
Linha <38>	35	0	1650	2,0	0
Linha <39>	36	0	1650	2,0	0
Linha <40>	37	0	1650	2,0	0
Linha <41>	38	0	1650	2,0	0
Linha <42>	39	0	1650	2,0	0
Linha <43>	40	0	1650	2,0	0
Linha <44>	41	0	1650	2,0	0
Linha <45>	42	0	1650	2,0	0
Linha <46>	43	0	2200	4,9	0
Linha <47>	44	0	1650	2,0	0
Linha <48>	45	0	1650	2,0	0
Linha <49>	46	0	3300	5,2	0

(cont.)

Linha <50>	47	0	1650	2,0	0
Linha <51>	48	0	1650	2,0	0
Linha <52>	49	0	4200	5,0	0
Linha <53>	50	0	1650	2,0	0
Linha <54>	51	0	1650	2,0	0
Linha <55>	52	0	3300	5,0	0
Linha <56>	53	0	1650	2,0	0
Linha <57>	54	0	1650	2,0	0
Linha <58>	55	0	3300	5,1	0
Linha <59>	56	991	3300	5,1	18
Linha <60>	57	1207	3600	4,0	11
Linha <61>	58	0	3600	3,9	0
Linha <62>	59	0	3600	3,5	0
Linha <63>	60	948	3600	4,1	10
Linha <64>	61	0	3600	3,3	0
Linha <65>	62	0	3800	3,9	0
Linha <66>	63	970	3800	3,5	13
Linha <67>	64	0	3600	4,1	0
Linha <68>	65	0	3600	3,6	0
Linha <69>	66	1084	3600	4,0	25
Linha <70>	67	0	3600	5,4	0
Linha <71>	68	0	3390	5,5	0
Linha <72>	69	1341	4200	5,5	19
Linha <73>	70	0	3390	5,5	0
Linha <74>	71	797	3000	5,5	22
Linha <75>	72	0	3300	5,5	0
Linha <76>	73	0	3600	2,0	0
Linha <77>	74	0	3600	2,0	0
Linha <78>	75	0	3600	2,0	0
Linha <79>	76	0	3600	2,0	0
Linha <80>	77	0	3600	2,0	0
Linha <81>	78	0	3600	2,0	0
Linha <82>	79	0	3600	2,0	0
Linha <83>	80	0	3600	2,0	0
Linha <84>	81	0	3600	2,0	0
Linha <85>	82	0	3600	2,0	0
Linha <86>	83	0	3600	2,0	0
Linha <87>	84	0	3600	2,0	0
Linha <88>	85	746	3600	4,5	21
Linha <89>	86	0	3600	2,0	0
Linha <90>	87	0	3600	2,0	0
Linha <91>	88	0	3390	4,5	0
Linha <92>	89	0	3600	2,0	0
Linha <93>	90	0	3600	2,0	0
Linha <94>	91	0	4200	4,5	0
Linha <95>	92	0	3600	2,0	0
Linha <96>	93	0	3600	2,0	0
Linha <97>	94	0	3390	4,5	0
Linha <98>	95	0	3600	2,0	0
Linha <99>	96	0	3600	2,0	0

(cont.)

Linha <100>	97	0	3000	4,5	0
Linha <101>	98	1081	3300	4,5	12
Linha <102>	99	1051	4400	4,0	9
Linha <103>	100	0	4400	3,9	0
Linha <104>	101	0	4400	3,6	0
Linha <105>	102	1180	4400	4,0	13
Linha <106>	103	0	4400	3,4	0
Linha <107>	104	1222	3600	4,2	14
Linha <108>	105	0	3600	3,2	0
Linha <109>	106	0	3000	3,8	0
Linha <110>	107	0	3000	3,9	0
Linha <111>	108	1357	3000	4,0	12
Linha <112>	109	859	3600	4,2	13
Linha <113>	110	0	3300	4,3	0
Linha <114>	111	1531	4200	4,2	14
Linha <115>	112	0	3300	4,2	0
Linha <116>	113	759	3300	4,2	13
Linha <117>	114	1116	3300	4,2	18

Descrição**Linha <1>** Título do arquivo**Linha <2>** Primeira coluna: número de períodos com informação de fluxos; segunda: duração de cada período (s); terceira: quantidade de arcos na rede; quarta: maior ID dos arcos**Linha <3>** Primeira coluna: tempo em que o período de observação é encerrado; segunda: número do período de observação**Linha <4+n>** Primeira Coluna: ID do arco, segunda: fluxo observado (veic./hora) terceira: capacidade do arco (veic./hora); quarta: tempo de viagem de fluxo livre (s); quinta: tempos de viagem observado (s).

- Arquivo mestre

Linha <1>	ARQUIVO MESTRE: ÁREA DE ESTUDO		
Linha <2>	33	1000	0.01
Linha <3>	5	20	0.1
Linha <4>	0	1	0
Linha <5>	\		
Linha <6>	qodout\		
Linha <7>	ae_01.dat		
Linha <8>	ae_02.dat		
Linha <9>	ae_032.dat		
Linha <10>	ae04ODam.dat		
Linha <11>	none		
Linha <12>	060427.dat		
Linha <13>	none		
Linha <14>	none		
Linha <15>	ae_092.dat		
Linha <16>	ae_10.out (<i>sumário da estimação</i>)		
Linha <17>	ae_11.out (<i>matriz estimada</i>)		
Linha <18>	ae_12.out (<i>rota mínima</i>)		
Linha <19>	ae_13.out (<i>fluxos estimados</i>)		
Linha <20>	ae_14.out (<i>movimentos nas interseções</i>)		
Linha <21>	ae_15.out (<i>diferenças entre demandas</i>)		
Linha <22>	ae_16.out (<i>diferenças entre fluxos</i>)		

Descrição

Linha <1> Título do arquivo

Linha <2> Primeira coluna: critério de erro [xy] (x - erro entre demandas e y - erro entre fluxos) (1 - erro quadrático, 2 - erro poissoniano e 3 - erro relativo); segunda: número de iterações e terceira: critério de convergência.

Linha <3> Primeira coluna: número de rotas máximas utilizadas; segunda: número de passos considerado na transferência da demanda entre as rotas possíveis ($1 < x < 100$) (recomendado $10 < x < 20$) e terceira: fator de ajuste do tempo de viagem ($0 < x < 1$).

Linha <4> Primeira Coluna: consideração sobre o fluxo de tráfego observado igual a zero (0 - ignorar, não considerando como uma restrição, 1 - trata o arco como qualquer outro e 2 - assume o valor do fluxo ser igual a 1 veículo/hora), segunda: restrição de capacidade (0 - desconsidera a capacidade do arco na a estimação e 1 - considera a capacidade do arco na estimação) e terceira: consistência dos fluxo do tráfego (recomendado no manual utilizar o valor 0).

Linha <5> Diretório dos arquivos de entrada.

Linha <6> Diretório dos arquivos de saída.

Linha <7> Nome no arquivo de nós (obrigatório).

Linha <8> Nome do arquivo de arcos (obrigatório).

Linha <9> Nome do arquivo de semáforo (obrigatório).

Linha <10> Nome do arquivo da matriz semente (opcional).

Linha <11> Nome do arquivo de incidentes (opcional).

Linha <12> Nome do arquivo de fluxos observados (obrigatório).

Linha <13> Nome do arquivo de conversões nas interseções (opcional).

Linha <14> Nome do arquivo de rotas (opcional).

Linha <15> Nome do arquivo com a atual matriz OD (opcional) (fins acadêmicos)

Linha <16+> Arquivos de saída

none = arquivo não fornecido