

Modelagem da matriz OD sintética a partir dos volumes observados nas interseções da rede de transportes

Bruno Vieira Bertoncini¹ e Eiji Kawamoto²

Resumo: O objetivo deste trabalho é propor e verificar a hipótese de que contagem de tráfego nas interseções da rede de transportes, ao invés de contagem de tráfego nos arcos, reduz o grau de indeterminação e torna mais precisa a modelagem da matriz OD sintética. Após breve revisão teórica sobre o estado da arte do tema, apresentou-se o detalhamento da proposta e foram realizados testes experimentais a fim de comprovar a hipótese formulada. TransCAD foi o software comercial usado na realização de testes. Cinco cenários foram avaliados, dois correspondentes ao atual estado da arte e três simulando a aplicação da proposta apresentada neste artigo, de forma a verificar não apenas o efeito do uso das contagens nos nós, mas também da quantidade e distribuição destas contagens na rede. Os resultados obtidos com a aplicação do método proposto neste trabalho foram superiores aos provenientes dos métodos utilizados atualmente, principalmente nas situações em que não se dispõem de matrizes semente de qualidade. Assim, a hipótese formulada não pôde ser refutada. DOI:10.4237/transportes.v20i2.562.

Palavras-chave: matriz sintética, contagens em interseções, matriz OD.

Abstract: The aim of this work is to propose and verify the hypothesis that traffic counts collected at network intersections, instead of those collected on links, reduce indeterminacy and make more accurate reconstruction of the synthetic OD matrix. After summarizing the state of art, the proposed method is described and experiments were carried out in order to verify the hypothesis. TransCAD was the commercial software used to perform the tests. Five scenarios were proposed, two corresponding to the state of art and three simulating the new method, in order to verify not only the effect of using nodes counts, but also the amount and distribution of the traffic counts on the network. The main conclusion was that the OD matrix reconstruction based on traffic counts collected at network intersections presents a better performance in contrast to the traditional methods based on links counts. Therefore, the formulated hypothesis for this work cannot be refuted.

Keywords: synthetic matrix, intersection counts, OD trip table.

1. INTRODUÇÃO

A modelagem da matriz origem-destino (OD) sintética, a partir das contagens de tráfego, tem o intuito de reduzir custos de coleta de dados em entrevistas domiciliares e superar dificuldades inerentes à obtenção de uma matriz representativa do comportamento das viagens. Este problema pode ser interpretado como inverso das técnicas de alocação de tráfego, pois se busca reconstituir um conjunto de fluxos entre pares de zonas OD que, uma vez alocados na rede, reproduzam os volumes observados nos seus arcos. Nesse caso específico, o modelo tem por objetivo *reconstruir* – e não *estimar*, como se convencionou chamar – uma matriz OD que produziu os volumes observados em campo (Hazelton, 2001). Se, por outro lado, o objetivo for *estimar* os parâmetros populacionais do fenômeno em questão, ou seja, do padrão dos deslocamentos na área em estudo, tem-se então um problema distinto, adequadamente denominado de estimação de matrizes OD sintéticas (Pitombeira *et al*, 2011).

Todavia, Willumsen (1981) chama atenção para o fato de que os dados de fluxos observados em campo, além de serem normalmente inconsistentes, apresentam também algum grau de dependência entre si, com algumas contagens se tornando redundantes, sem acrescentar informação para a

obtenção da matriz OD sintética. Ademais, o principal desafio teórico para a solução do problema da reconstrução da matriz OD sintética em contextos reais diz respeito ao fato de o número de pares OD ser normalmente bastante superior ao número de arcos com volumes conhecidos e não redundantes (quando não é possível obter este volume através da combinação linear de outros arcos com contagem), tornando o sistema de equações sub-especificado, isto é, constituindo um problema indeterminado.

Em suma, não é possível reconstruir uma matriz OD somente com base em dados de contagem de tráfego nos arcos. Timms (2001) elenca os seguintes tipos de informação adicional a ser utilizada na obtenção de matrizes sintéticas: a) matriz antiga, ou semente, conhecida *a priori*; b) matrizes parciais obtidas, por exemplo, a partir de pesquisas de placas; c) contagens diretas de fluxos entre pares OD; d) contagens dos totais de viagens entrando e saindo de cada zona; e) modelos que expliquem o comportamento da demanda, do tipo gravitacional, de escolha modal ou de demanda direta.

Portanto, como definido por Cascetta e Nguyen (1988), o objetivo na formulação deve ser obter a matriz OD de viagens por meio da combinação eficiente dos dados de contagem de tráfego nos arcos e de toda e qualquer outra informação a priori disponível, ou ainda partindo de suposições sobre o comportamento dos usuários. Obtenção de informações adicionais geram custos, inerentes à coleta de dados, e a disponibilidade de matrizes semente de viagens de boa qualidade constitui uma realidade distante no contexto do planejamento de transportes das cidades brasileiras, pois são raras as cidades no país que dispõem de alguma matriz OD obtida no passado. Reduzir a indeterminação do pro-

¹ Bruno Vieira Bertoncini, Grupo de Pesquisa em Transporte, Trânsito e Meio Ambiente, Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil. (e-mail: bruviber@gmail.com).

² Eiji Kawamoto, Departamento de Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil. (e-mail: eiji@usp.br).

blema da modelagem sintética é um desafio que, quando resolvido, possibilitará a reconstrução de uma matriz OD com qualidade. A questão que se levanta é como contornar esse problema sem coletar dados além das próprias contagens de tráfego?

Assim, o objetivo deste trabalho é propor e verificar a hipótese de que contagens de tráfego nas interseções da rede de transportes, ao invés de somente contagens de tráfego nos arcos como comumente utilizado, contribuem para a redução do grau de indeterminação, elevando a qualidade da matriz OD sintética modelada. Para tal, os objetivos específicos e a correspondente organização no texto são: (i) apresentar como a informação adicional tem sido utilizada na modelagem da matriz OD sintética (item 2); (ii) demonstrar matematicamente a ideia proposta pelo presente trabalho (item 3); (iii) testar a proposta por meio de um experimento controlado, verificando os efeitos causados pelo número de interseções com contagem, assim como aqueles resultantes de uma maior distribuição das contagens na rede (item 4); (iv) analisar os resultados obtidos (item 5); e (v) obter conclusões e questões que motivem surgimento de novas pesquisas (item 6).

2. USO DE INFORMAÇÃO ADICIONAL NA RECONSTRUÇÃO DA MATRIZ OD SINTÉTICA

Van Zuylen (1978) foi o primeiro a reconhecer que apenas contagens de tráfego nos arcos seriam insuficientes para modelar sinteticamente a matriz OD. Então, incorporou ao problema um termo que representa a probabilidade de ocorrer uma viagem entre o par OD ij , informação obtida a partir de uma matriz semente, conforme Equação (1).

$$\min l = \sum_a \sum_{ij} T_{ij} \cdot p_{ij}^a \cdot \ln \left(\frac{T_{ij} \cdot t}{V_{obs}^a \cdot t_{ij}} \right) \quad s.a. \quad (1)$$

$$V_{obs}^a = \sum_{ij} p_{ij}^a \cdot T_{ij} \quad e \quad T_{ij} \geq 0, \forall a, \forall ij$$

Na qual T_{ij} representa as viagens realizadas entre os pares de zonas ij ; p_{ij}^a a probabilidade de uma viagem ij utilizar o arco a ; t_{ij} a quantidade de viagens entre ij e t o total de viagens na matriz OD semente; V_{obs}^a o volume de tráfego observado ao arco a da rede.

Em 1980, Van Zuylen e Willumsen propuseram uma discussão sobre modelos de reconstrução baseados na maximização da entropia e no uso da minimização da informação, resultando em um modelo que unifica as ideias de Van Zuylen (1978) e Willumsen (1979), conforme apresentado na Equação (2).

$$\max Z(T_{ij}, t_{ij}) = \frac{T!}{\prod_{ij} T_{ij}!} \cdot \prod_{ij} \left(\frac{t_{ij}}{t} \right)^{T_{ij}} \quad s.a. \quad (2)$$

$$V_{obs}^a = \sum_{ij} p_{ij}^a \cdot T_{ij} \quad e \quad T_{ij} \geq 0 \quad \forall ij$$

Do ponto de vista filosófico, conforme destacado por Timms (2001), o modelo unificado parte da forte premissa de que o responsável pela modelagem da rede tem um conhecimento *a priori* do comportamento da demanda, a ser incorporado como informação adicional por meio da matriz semente, tornando o objetivo do problema selecionar uma

única ou “melhor” matriz, dentre as que satisfazem as restrições de fluxos, que mais se assemelha a essa matriz fornecida como *input*. A semelhança entre a matriz semente e a solução final obtida depende de quão a estrutura da primeira é compatível com os volumes observados em campo.

O uso de matriz semente também foi proposto por Nielsen (1993) em um modelo para reconstrução da matriz OD sintética, baseado na minimização da diferença absoluta entre os volumes observados e os volumes alocados a partir da matriz OD reconstruída. Trata-se de um processo iterativo, dependente do conhecimento prévio de uma matriz OD semente, sendo que em uma primeira iteração os volumes alocados correspondem a esta semente. Matematicamente, o modelo proposto pode ser expresso conforme Equação (3).

$$\min E = \left| V_{obs}^a - V_{aloc}^a \right|, a \in r$$

$$\text{Sendo, } T_{ij} = \frac{N_r}{\sum_a \frac{V_{aloc}^a}{V_{obs}^a \cdot t_{ij}}} \quad (3)$$

Em que E é o valor de erro esperado; N_r são as contagens no caminho mínimo r ; e V_{aloc}^a é o volume de tráfego correspondente a alocação da matriz OD aos arcos a da rede de transportes. Os demais termos são como definido anteriormente.

O método de Nielsen foi implementado pela Caliper (2005) no programa SIG-T TransCAD, um programa que possui sistema de informações georeferenciadas aplicadas a transportes. Pode-se afirmar que o modelo é dependente de uma matriz OD semente; caso não seja fornecida não haverá reconstrução, apesar do manual do programa não explicitar tal informação, porém esta conclusão é possível analisando a Equação (3). Ademais, Nielsen (1993) destaca que a proposta é sensível à técnica de alocação, ao valor mínimo de erro e , principalmente, à qualidade da matriz semente. A vantagem do método implementado está em permitir ao planejador a escolha da técnica de alocação que melhor reflete suas necessidades, diferentemente dos demais programas que não permitem tal consideração. Todavia, Nielsen (1993) faz a ressalva que seu modelo apresenta melhor desempenho quando utilizado com a técnica de alocação baseada no equilíbrio do usuário. A principal diferença entre o método proposto por Nielsen e o modelo de Van Zuylen e Willumsen (1980), reside no fato de não fazer uso do paradigma de maximização da entropia, que faz analogia ao comportamento físico dos gases (Timms, 2001), mas sim na minimização das diferenças absolutas entre volumes. Assim, o modelo de Nielsen depende sobremaneira da matriz OD semente, pois em uma primeira iteração ela é quem resultará no conjunto de volumes alocados; do contrário, não seria possível calcular o que se denomina expectativa de demanda e , conseqüentemente, a matriz OD não poderia ser reconstruída.

Em 1999, Paramahamsan apresentou um comparativo entre modelagens que consideram, ou não, matriz semente. De acordo com o autor, ao informar os valores prévios de uma viagem, reduz-se o número de respostas possíveis capazes de satisfazer as restrições, aumentando a probabilidade de a resposta obtida estar correta. Pode-se afirmar que as considerações aqui expostas refletem o atual estado da arte, no que tange ao uso de matriz semente como fonte de informação adicional ao modelo sintético.

O uso de matriz OD conhecida *a priori* é notoriamente a principal fonte de informação adicional na modelagem da matriz OD sintética. No entanto, Van Zuylen e Willumsen (1980) utilizaram contagens de tráfego nas interseções como fonte de informação adicional para corrigir o problema da falta de continuidade volumétrica nos nós, ou seja, garantir a manutenção da lei de Kirchoff, que preconiza que fluxos que entram em um nó, devem ser iguais aos que saem, desde que este nó seja apenas de passagem. Willumsen (1981) aponta que a não manutenção do equilíbrio no nó acarreta problemas à reconstrução da matriz de viagens, fazendo com que o volume reconstruído, proveniente da alocação da matriz OD reconstruída à rede de tráfego, se diferencie do volume observado. Assim, na proposta de Van Zuylen e Willumsen (1980) os volumes contados na interseção serviram para corrigir possíveis falhas nos dados de entrada, de forma a respeitar o equilíbrio no nó.

Em 1994, Hellinga propôs uma heurística para determinar a matriz de viagens baseada nas contagens volumétricas realizadas nas interseções e nas taxas de conversão de cada viagem nas interseções. De acordo com o autor, aplicando essa ideia a todas as interseções, seria possível retornar a matriz de viagens, com a vantagem de não demandar técnicas de alocação para definir as rotas de viagem e tampouco depender de técnicas de otimização, tais como maximização da entropia e minimização da informação. O modelo proposto é expresso matematicamente conforme Equação (4).

$$V_{obs}^{kS} = \sum_x (p_x^k \cdot V_{obs}^{xE}) \quad (4)$$

Sendo, V_{obs}^{kS} o fluxo observado que sai do arco k ; p_x^k proporção de fluxo que entra no arco x e vai para o arco k ; V_{obs}^{xE} fluxo observado que entra no arco x .

A grande dificuldade do modelo expresso na Equação (4) é que o número de incógnitas continua superior ao de informações. A verificação da proposta foi feita considerando uma via arterial, com poucas entradas e saídas, o que facilitou a verificação da ideia. Do contrário, seria necessário inserir ao modelo alguma abordagem que permita determinar as porcentagens de conversão de cada uma das viagens, tal qual a um modelo de alocação, o que invalida um dos pon-

tos positivos listados por Hellinga (1994).

Via de regra, os volumes de conversão ainda não fazem parte diretamente do processo de reconstrução da matriz OD. Pôde-se perceber que há ainda um paradigma de que volumes de conversão devem ser utilizados para garantir a continuidade volumétrica nas interseções, ou então, contribuir à escolha de rota, em que as proporções (taxas) de conversão em cada cruzamento são restrições a serem respeitadas no processo de alocação.

Acredita-se que a utilização de informações referentes aos movimentos de conversão no processo de reconstrução da matriz OD, como integrantes do conjunto de restrições, poderá trazer benefícios. Desta forma, pretende-se quebrar o paradigma de considerar os volumes de conversão como instrumentos para garantir a manutenção da continuidade volumétrica no nó. Para tal, é preciso ter uma proposta menos limitada e que incida diretamente no processo de reconstrução, como uma informação adicional ao problema.

3. CONSIDERAÇÃO DOS MOVIMENTOS DE CONVERSÃO NA MODELAGEM DA MATRIZ OD SINTÉTICA

Conceitualmente, a proposta apresentada neste artigo é que os volumes contados nas aproximações de uma interseção, com seus respectivos movimentos de conversão, façam parte do conjunto de restrições de um modelo para reconstrução da matriz OD sintética, aumentando o número de informações e, conseqüentemente, reduzindo a indeterminação.

Considere $Rd(N,A)$ uma rede de transporte composta por um conjunto N de nós e um conjunto A de arcos orientados (com origem em n_o e final em n_f). Considere também que M_z representa o conjunto de movimentos permitidos em uma aproximação (z) [$M_z = (e_z, re_z, d_z)$ – esquerda, reto, direita]. Dependendo da configuração da interseção, é possível haver 2, ou mais aproximações em uma mesma interseção (nó). Na Figura 1 é apresentada a configuração de interseção tipo cruz, na qual é possível observar a representação do arco orientado a e do seu nó final nf , uma aproximação z , qualquer, e os respectivos movimentos possíveis em z (Figura 1(b)).

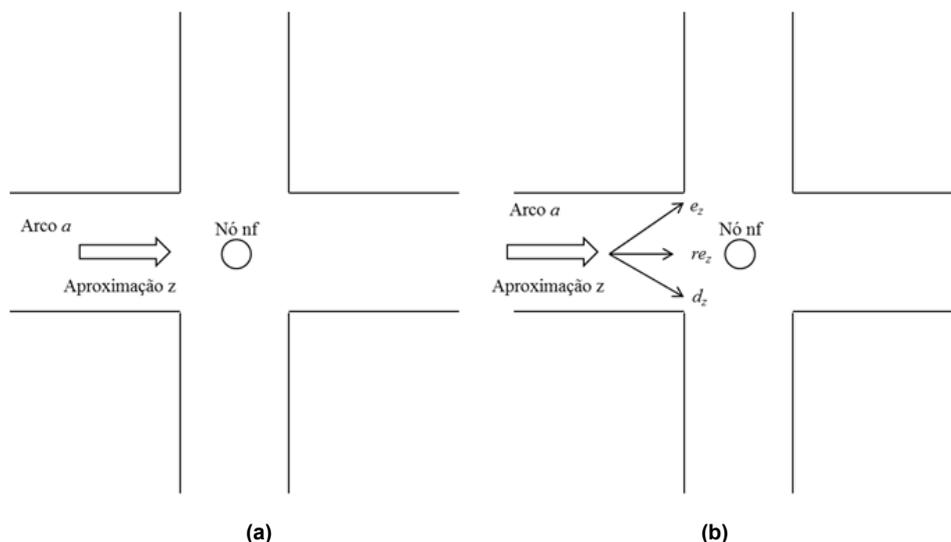


Figura 1. (a) Interseção tipo cruz; (b) Movimentos permitidos para aproximação z

Seja $N_c \subset N$ o conjunto contendo nós cujos fluxos foram observados e $V_n = (V_n^{M_1}, V_n^{M_2}, \dots, V_n^{M_z})$ o conjunto de fluxos observados no nó $n \in N_c$, conforme o movimento por aproximação (M_z) e $V = (V_n)$ o conjunto de todos os V_n .

Os fluxos observados contidos no conjunto V serão alocados a "arcos virtuais", criados exclusivamente para essa função. De acordo com Martin e Bell (1992), Glover *et al* (1977) foram os primeiros a propor o uso de nós e arcos artificiais para facilitar a obtenção de respostas da programação linear desenvolvida para estimar os fluxos de conversão em interseções: tal informação seria utilizada para controle de tráfego. Os nós e arcos artificiais servem para dar suporte a alguma função a ser desempenhada e não interferem no comportamento da rede; vale mencionar que para Glover *et al* (1977) a capacidade desses arcos seria infinita, evitando assim qualquer interferência.

A ideia, no presente trabalho, ao fazer uso de arcos virtuais é possibilitar a inclusão das contagens nos nós em um programa, ou método, para reconstrução de matriz de viagem que foi desenvolvido exclusivamente para contagens nos arcos. Portanto, haverá um arco virtual para receber o fluxo de determinada aproximação, representando o movimento permitido com contagem realizada em campo.

Assim, $L = (av_1, av_2, \dots, av_n)$ é o conjunto de arcos virtuais que receberão os fluxos observados conforme movimento. Como recurso auxiliar, será criado o conjunto $Y = (I_1, I_2, \dots, I_n)$ de nós auxiliares que darão a direção de cada arco pertencente a L . Assim, um arco virtual com origem no nó auxiliar k e final no nó auxiliar m é definido como $av_n(I_k, I_m)$; mas um arco virtual também pode ter como origem um nó real e terminar em um nó virtual, ou vice-versa. Dessa forma, O representa o conjunto de todos os arcos da rede R (reais e virtuais), tal que $O \equiv (A; L)$.

Conhecidos os valores dos volumes observados nos arcos (a) pertencentes ao conjunto O da rede e as rotas utilizadas para as viagens, é válido afirmar que a relação entre as demandas que utilizam um dado arco ($p_{ij}^a \cdot T_{ij}$) e o volume de tráfego observado neste arco (V_{obs}^a) é expressa pela Equação (5), que é a restrição da grande maioria dos métodos de reconstrução da matriz OD sintética, tido como a chave do problema (Willumsen, 1981).

$$V_{obs}^a = \sum_{ij} p_{ij}^a \cdot T_{ij} \quad a \in O \quad (5)$$

Pode-se afirmar que o volume de tráfego que passa pelo arco $a \in A$, com nó inicial n_o e final n_f ($n_f \in N_c$), é dado pela soma dos fluxos observados na aproximação z , que o arco a faz ao nó $n_f \in V$, conforme ilustrado na Figura 1 (a) e (b), matematicamente expresso pela Equação (6).

$$V_{obs}^{a(n_o, n_f)} = \sum_z V_{n_f}^{M_z} \quad (6)$$

Os fluxos T_{ij} podem ser recuperados pelo princípio da maximização da entropia, bastando obter a solução para o problema de maximização do tipo:

$$\text{Maximizar } \sum_{i,j} (-T_{ij} \cdot \ln T_{ij} + T_{ij}), \text{ sujeito a (5)} \quad (7)$$

O uso da maximização da entropia consiste apenas em uma sugestão para reconstruir a matriz OD. Acredita-se que qualquer modelo matemático utilizado para recuperar a matriz OD sintética possa ser utilizado em conjunto com a ideia apresentada neste trabalho, desde que tenha a Equação (5), ou suas derivações, como restrição do problema.

Em suma, a proposta é aumentar o número de restrições (Equação (5)) devido ao aumento de informações provenientes das contagens. Teoricamente as vantagens desta proposta são: (i) aumento na quantidade de informação de fluxo; (ii) possibilidade de ser utilizada por qualquer programa comercial de modelagem da matriz OD sintética.

4. VERIFICAÇÃO DA PROPOSTA

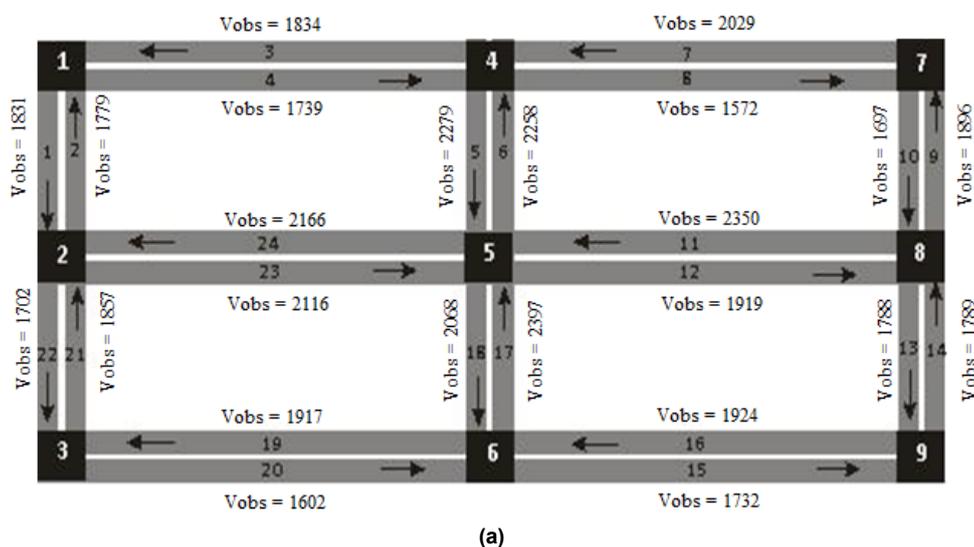
Por ser inócuo desenvolver um experimento amparado em uma situação real, que não permitiria inferir se possíveis erros são provenientes dos dados de entrada ou do método empregado, optou-se por verificar a proposta utilizando um experimento hipotético, o qual possibilita o controle sobre os dados de entrada.

A rede viária hipotética é constituída de 9 nós (todos origem e destino) conectados entre si por 24 arcos orientados, conforme ilustrada na Figura 2 (a). A escolha desta configuração de rede deve-se ao fato de redes viárias com formato de grelha ser comum nos municípios brasileiros. Essa rede é carregada com uma matriz OD, denominada "real" (Figura 2 (b)) e que possui dois objetivos: (i) fornecer as contagens de tráfego, equivalentes a uma contagem *in loco*, obtidas a partir da alocação da matriz "real" à rede, pelo método do equilíbrio determinístico do usuário; e (ii) servir de referência na comparação dos resultados obtidos, permitindo assim mensurar os erros resultantes. Cada arco da presente rede tem associado uma função matemática para cálculo do tempo de viagem, único custo para utilização dos arcos, expressa conforme BPR (1964), com parâmetros $\alpha = 0,15$ e $\beta = 4$.

A alocação da matriz OD à rede viária foi realizada utilizando o método de equilíbrio determinístico do usuário implementado no programa TransCAD 4.8, considerando erro máximo igual a 0,01 e o máximo de iterações possível (Caliper, 2005). O resultado da alocação é apontado ao lado dos respectivos arcos na Figura 2 (a) como V_{obs} , uma vez que o volume resultante da alocação em um arco será considerado o volume observado naquele arco para efeito de reconstrução da matriz OD.

O problema da reconstrução da matriz OD sintética da rede viária hipotética apresentada na Figura 2 (a) possui, no mínimo, 72 incógnitas, caso apenas uma possibilidade de caminho entre cada par OD seja considerada, e, no máximo, 605 incógnitas, caso considere todas as possibilidades de caminho entre os pares OD. Por outro lado, é possível obter no máximo 24 informações de volume provenientes das contagens nos arcos. Como o número de incógnitas é maior que o de informações, não há garantias que a matriz obtida seja igual à original (matriz real). A expectativa é que ela se acerque da real à medida que se aumenta o número de informações adicionais. É este o objetivo desta verificação.

A modelagem da matriz origem-destino foi obtida utilizando o TransCAD 4.8, que tem implementado o método de Nielsen (1993). A opção por este programa deve-se a dois motivos: (i) Timms (2001) afirma que o TransCAD apresenta bom desempenho na modelagem da matriz OD sintética; e (ii) permite reconstruir a matriz OD a partir da in-



(a)

O.D	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Σ
1	-	406	464	330	418	175	276	159	371	2.599
2	204	-	386	415	233	225	416	219	484	2.582
3	176	377	-	351	419	187	245	246	288	2.289
4	334	203	309	-	487	231	204	213	210	2.191
5	337	414	246	184	-	199	466	260	328	2.434
6	455	462	226	371	311	-	165	320	353	2.663
7	407	428	179	172	347	451	-	323	434	2.741
8	284	282	275	359	475	265	401	-	326	2.667
9	444	268	364	350	476	477	310	298	-	2.987
Σ	2.641	2.840	2.449	2.532	3.166	2.210	2.483	2.038	2.794	23.153

(b) Matriz OD que demanda a rede

Figura 2. (a) Rede viária hipotética; (b) Matriz OD que demanda a rede

formação das taxas de conversão ao final de cada arco, fazendo com que esses percentuais sejam respeitados no processo de alocação, o que permitirá verificar se a ideia proposta neste trabalho é mais robusta que a utilização das taxas de conversão, aplicada para garantir a continuidade nos nós.

O processo de reconstrução implementado no TransCAD consiste em uma técnica bi-nível, na qual o problema da alocação é resolvido no 1º nível, fornecendo as proporções dos fluxos O-D em cada arco que alimentarão, juntamente com os volumes observados e uma matriz semente, a iteração seguinte do problema da reconstrução da matriz O-D, representado no 2º nível. Compete ao usuário definir o método de alocação a ser utilizado, sendo que neste estudo foi adotada a técnica de alocação de equilíbrio determinístico do usuário, pois é considerada o método mais indicado para o processo de reconstrução (Nielsen, 1993) e pelo fato dos volumes observados corresponderem ao princípio do equilíbrio. Com isto, o mesmo processo adotado para obtenção dos volumes observados, foi utilizado para reconstruir a matriz OD que os representa.

Outra variável importante ao processo de reconstrução utilizando o TransCAD é a matriz OD semente. A fim de verificar os impactos causados na reconstrução, devido a qualidade da matriz OD semente, duas matrizes distintas e representativas de situações extremas foram utilizadas: (I) matriz semente binária: equivalente a uma situação em que não é fornecida matriz semente, ou seja, todas as viagens têm a mesma probabilidade de ocorrer – neste caso, viagens intrazonais recebem valor 0 e as viagens interzonais recebem valor 1, lembrando que o modelo sintético parte do pressuposto de que não existem viagens intrazonais (Willumsen, 1981); e (II) matriz semente equivalente a 70% da matriz OD real (denominada S_{70}): situação idealizada e bastante

favorável, em que a probabilidade de ocorrer uma viagem de i para j , dada pela matriz OD semente, é igual à da matriz real.

Estabelecidas as condições de contorno para realização dos testes experimentais, cinco cenários foram simulados:

- *Cenário 1*: representa a situação em que contagens são realizadas apenas nos arcos da rede viária, configurando um contexto usual na modelagem da matriz OD sintética, em que as contagens de tráfego são obtidas apenas nas seções das vias;
- *Cenário 2*: ilustrado na Figura 3 (a), considera inserção de informação adicional proveniente da contagem de tráfego nos nós. Neste caso, a contagem de tráfego foi realizada no nó 5, que possui maior indeterminação (66% das viagens OD possuem rotas que contêm este nó). Serão adicionadas 16 informações não redundantes provenientes da observação dos volumes nas aproximações, e respectivos movimentos de conversão, do nó 5; a rede passará a ter 40 informações não redundantes, o que diminui o grau de indeterminação. Foram inseridos, de acordo com a proposta, 16 arcos virtuais, cuja impedância seria igual a 10^{-15} u.t. (unidades de tempo) para não interferir na escolha da rota, pois os mesmos não integram de fato a rede;
- *Cenário 3*: simula uma situação em que também são inseridas 16 informações não redundantes; todavia as mesmas encontram-se dispersas na rede, as observações de volume foram em torno dos nós 1, 3, 7 e 9, conforme apresentado na Figura 3 (b). Acredita-se que este cenário não gere resultados iguais aos obtidos no Cenário 2, devido ao fato de as informações estarem distribuídas pela rede;
- *Cenário 4*: neste cenário as contagens ocorrem em

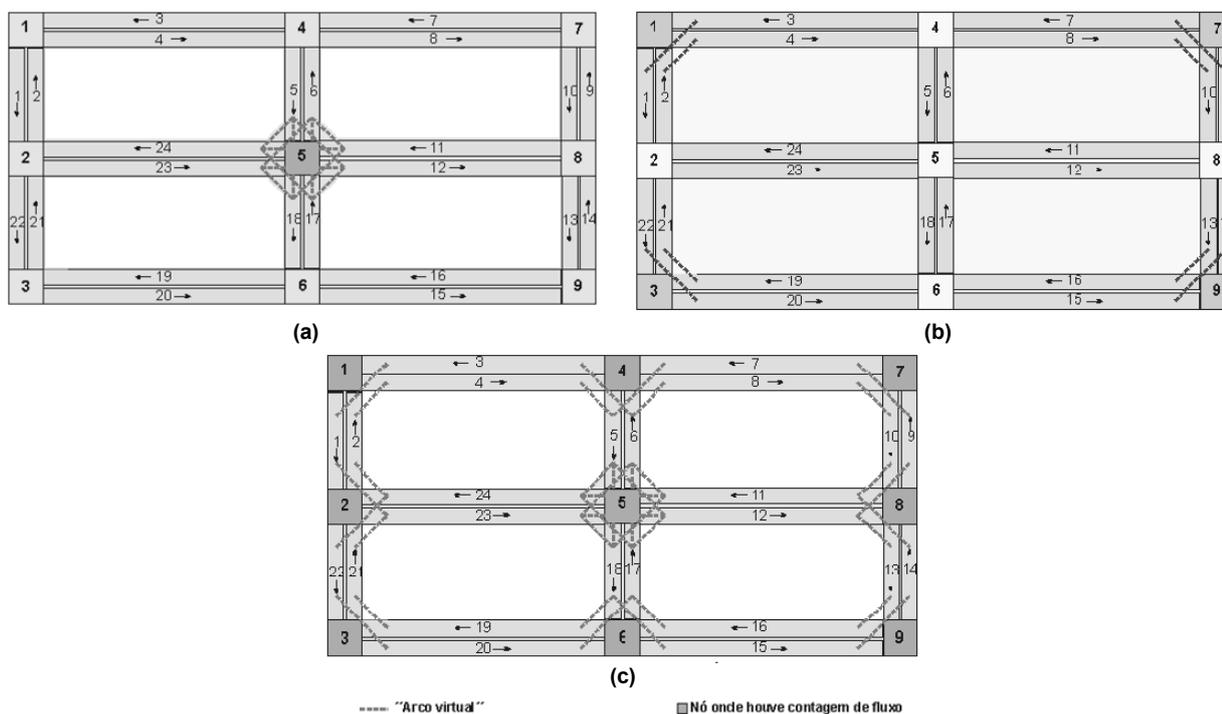


Figura 3. (a) Cenário 2; (b) Cenário 3; (c) Cenário 4

todos os nós da rede viária, como representado na Figura 3 (c). É a situação em que pode ser obtida a maior quantidade de informação não redundante relativa a volumes de tráfego para uma rede viária com esta configuração (ao todo 64 informações);

- **Cenário 5:** tem por objetivo mostrar que existem diferenças entre o método proposto no presente artigo e a consideração das porcentagens de conversão para manutenção do equilíbrio nos nós. Para tal, são atribuídos a todos os nós os percentuais de conversão, mostrando com isso as diferenças entre a abordagem proposta neste trabalho e a que vem sendo utilizada com finalidade de garantir a continuidade nos nós.

5. ANÁLISES DOS RESULTADOS

Esta seção terá por objetivo analisar e confrontar os resultados obtidos em cada um dos cinco cenários do experimento proposto, tendo como questão central de comparação os valores das viagens contidas na matriz OD real. As análises irão focar os impactos causados devido ao uso de informação adicional, assim como a relação dos resultados e a matriz semente utilizada. Na Figura 4 são apresentados os dia-

gramas de dispersão, entre os valores das viagens reconstruídas e os valores das viagens reais, para cada um dos cenários avaliados. Na Tabela 1 é possível verificar os valores dos coeficientes de dispersão para cada um dos cenários avaliados, conforme a matriz semente utilizada.

Os resultados com menor dispersão foram obtidos ao considerar contagens realizadas em todas as interseções (Cenário 4), que reflete a proposta apresentada por este trabalho. No Cenário 4 foram fornecidas 64 informações não redundantes relativas a contagem de tráfego, que corresponde ao máximo número de informações provenientes de contagens para esta configuração de rede. O valor do coeficiente R^2 foi igual a 0,59, considerando matriz semente unitária, e 0,93 com matriz S_{70} . Comparando estes resultados com o Cenário 1 (que considera contagens apenas nos arcos) houve uma melhoria no valor de R^2 , passando de 0,0009 para 0,53 com matriz semente unitária e 0,78 para 0,93 com S_{70} , indicando que o método proposto torna-se vantajoso, em comparação com a proposta atual de contagens apenas nos arcos, inclusive quando não se dispõem de matriz semente e tem que abrir mão de uma matriz como a unitária. Aliás, a consideração de contagens apenas nos arcos (Cenário 1) gerou resultados muito ruins, principalmen-

Tabela 1. Coeficientes de dispersão obtidos nos cenários avaliados

Cenário	R^2	
	Matriz semente unitária	Matriz semente S_{70}
Cenário 1: Contagens de tráfego realizadas apenas nos arcos da rede viária, conforme utilizado atualmente.	0,0009	0,7838
Cenário 2: Seguindo a proposta apresentada neste trabalho, foram inseridas contagens adicionais em torno do nó 5.	0,0773	0,8631
Cenário 3: Também segue a proposta deste trabalho e considera realização de contagens nos nós 1, 3, 7 e 9.	0,1923	0,8598
Cenário 4: Considera contagens realizadas em todos os nós da rede viária.	0,5985	0,9396
Cenário 5: Utiliza os percentuais de conversão em cada nó da rede viária como forma de garantir a manutenção do equilíbrio no nó, conforme utilizado atualmente.	0,0386	0,8729

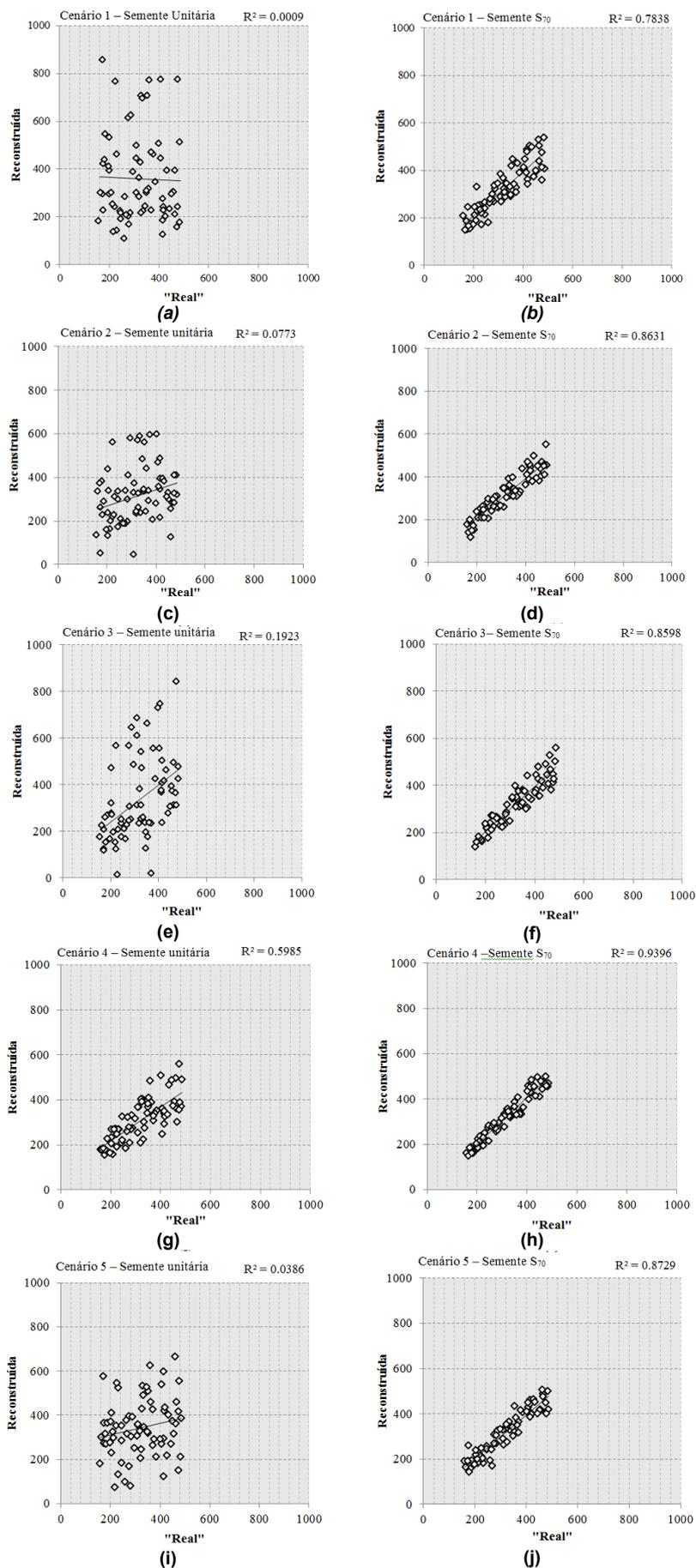


Figura 4. Diagramas de dispersão entre valores reais e reconstruídos

te quando se utilizou matriz semente unitária, indicando que o modelo utilizado pelo TransCAD é muito sensível à qualidade/representatividade da matriz semente. Todavia, com

uma matriz semente representativa (S_{70}), os resultados só não foram melhores devido a quantidade de informações provenientes das contagens ser pequena (apenas 24), o que

leva a uma maior indeterminação.

Os Cenários 2 e 3 simulam situações em que contagens são realizadas em alguns nós da rede, tendo por objetivo verificar quais benefícios podem ser obtidos ao realizar contagens em alguns nós da rede, uma situação que poderá ser comum quando houver falta de recursos para realização de contagens. Nos dois cenários foram obtidos bons resultados, confrontando-os com o Cenário 1. Em ambos os casos foram inseridas 16 informações adicionais provenientes das contagens em interseções, a diferença é que no Cenário 2 resultou em um coeficiente de dispersão igual a 0,86, quando fez uso da matriz semente S_{70} , ligeiramente superior ao encontrado no Cenário 3, que possuía igual quantidade de contagens, porém distribuídas ao longo da rede, indicando que, possivelmente, devido a grande indeterminação em torno do nó 5, o uso de contagens nesta interseção trouxe benefícios. Todavia, este comportamento não foi observado quando fez uso da matriz semente unitária, provavelmente devido ao fato de o TransCAD ser muito sensível à matriz semente, sendo que a baixa representatividade desta matriz acabou sendo “compensada” pela maior distribuição das informações provenientes das contagens nos nós. De acordo com os resultados obtidos, a reconstrução da matriz OD sintética apresenta melhores resultados quando são fornecidas contagens nas interseções, conforme proposta apresentada, podendo-se afirmar que, quando não for possível realizar contagens em todos os nós da rede viária, é vantajoso realizar contagens em algumas interseções, resultando ganhos em torno de 10% no valor do coeficiente de dispersão, quando comparado ao Cenário 1. A principal constatação é que as melhorias são mais significativas quando não se dispõem de matriz semente de qualidade, indicando que os volumes de conversão além de contribuir para redução da indeterminação, compensam a baixa qualidade da matriz semente.

Os resultados gerados com aplicação do Cenário 5 mostram-se diferentes daqueles obtidos a partir da proposta deste artigo, o que comprova a diferença entre as abordagens. Ao fornecer as taxas de conversão em todas as interseções da rede viária (Cenário 5), foi possível garantir a observância do equilíbrio nos nós da rede, todavia tais informações não exerceram o mesma função da proposta deste trabalho, que preconiza o uso das contagens de acordo com movimentos permitidos nas interseções como restrições adicionais à modelagem da matriz OD sintética. Os resultados obtidos com o Cenário 4, comparados com os do Cenário 5, foram 8% melhores em termos de dispersão, ao usar matriz proporcional S_{70} ; considerando matriz semente unitária, os resultados foram mais significativos, sendo a dispersão do Cenário 4 muito menor que a apresentada pelo Cenário 5 (0,60 contra 0,04). Os resultados provenientes do Cenário 5, ao usar matriz S_{70} , se aproximaram dos obtidos nos Cenários 2 e 3, todavia nestes dois últimos cenários foram consideradas contagens em algumas interseções apenas. Pode-se dizer que a abordagem proposta neste artigo é mais eficiente que as considerações feitas, até então, a cerca dos movimentos de conversão na reconstrução da matriz OD sintética.

Nota-se que a qualidade da matriz OD semente é fator importante para o processo de reconstrução da matriz OD sintética utilizando o TransCAD. O uso de uma matriz semente proporcional, como a S_{70} , permitiu a obtenção de resultados menos dispersos, todavia, mesmo com semente de

tamanho qualidade, o modelo do TransCAD não permitiu recuperar a matriz OD original, apenas se acercou desta à medida que aumentou o número de volumes observados em interseções. Ao utilizar matriz semente unitária, simulando as situações em que não se tem disponível tal tipo de matriz, os resultados foram ruins, porém melhorias foram observadas com o uso de contagens nos nós. Pode-se dizer que os maiores ganhos obtidos pelo uso de informações provenientes das contagens nos nós ocorreram nesta situação. A explicação para tal fato é que as contagens nos nós reduziram a indeterminação do sistema, levando a obtenção de uma melhor solução, e “compensaram” a baixa qualidade da matriz semente. Neste caso a matriz semente serviu apenas para indicar quais pares OD apresentariam viagens entre si.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A proposta de considerar contagens de tráfego nas interseções, com intuito de aumentar a quantidade de informação, foi apresentada e os resultados obtidos mostraram-se satisfatórios, confirmando a hipótese estabelecida. Ainda assim, não foi possível recuperar a matriz OD original, pois, mesmo com aumento da quantidade de informação, o problema continua indeterminado.

Os volumes observados servem como pontos de referência que moldam a resposta. Disto infere-se que quanto mais pontos de referência, maiores são as chances de o resultado obtido se acercar do real. Por isso, a ideia de considerar os volumes observados nas interseções, conforme movimento, possibilitou a reconstrução de matrizes com menor quantidade de erros, em comparação com a situação em que se empregam apenas contagens nos arcos: o Cenário 4 apresentou R^2 de 0,94, enquanto que o Cenário 1 apresenta R^2 igual a 0,78. Observou-se, também, que os resultados apresentados no Cenário 4 foram melhores que os obtidos no Cenário 5, que caracteriza o tratamento dado, até então, aos fluxos observados nas interseções.

Idealmente, a proposta do presente artigo recomenda a realização de contagens em todos os nós da rede em estudo. Todavia, a opção por realizar contagens apenas no (s) ponto (s) com maior indeterminação (Cenário 2) permite a obtenção de resultados melhores – mesmo com matriz semente com pequena qualidade – que os obtidos pela técnica atualmente em uso (contagens apenas nos arcos, ou uso de taxas de conversão). Entretanto, constatou-se que o aumento das informações de contagens, associado com melhor distribuição na rede, agrega melhores resultados, conforme mostrou-se com o Cenário 3. No caso em estudo, os Cenários 2 e 3 tiveram igual número de informações adicionais, sendo que no Cenário 3 as informações estavam distribuídas na rede, possibilitando concluir que informações geograficamente bem distribuídas contribuem para minimizar a indeterminação, pois informações geograficamente concentradas tendem a apresentar muitas redundâncias entre si, enquanto que em outro caso a contribuição das informações é mais efetiva, podendo contornar o problema da baixa qualidade da matriz OD semente.

A adoção dos arcos virtuais possibilitou a aplicação da proposta deste trabalho no TransCAD, que não foi desenvolvido considerando as contagens de tráfego nas interseções como integrantes do conjunto restrição. Assim, é esperado que tal artifício possibilite o uso da técnica por outros programas de reconstrução, uma vez que todos eles consi-

deram volumes nos arcos como dados de entrada.

Em relação ao TransCAD, largamente utilizado no planejamento de transportes, deve-se ter atenção quanto à qualidade da matriz semente fornecida. O artifício de usar uma matriz binária não se mostrou eficiente, embora o uso combinado com contagem nos nós trouxesse melhorias aos resultados, levando a crer que a alternativa proposta neste trabalho será de grande valia para o planejador que deseja modelar a matriz OD sintética e não dispõe de matriz semente de qualidade, situação esta bastante comum no contexto de planejamento das cidades brasileiras. Mesmo partindo de uma matriz semente extremamente favorável (S_{70}), o programa não foi capaz de gerar resultados próximos aos valores reais. Quanto ao uso das taxas de conversão, é possível afirmar que gerou bons resultados, porém é muito mais prático e eficiente inserir os arcos virtuais, do que ter que calcular taxas de conversão e inseri-las no programa.

Cabe ressaltar que o estudo aqui apresentado constitui apenas um estudo de caso de uma rede hipotética. Serão necessárias mais verificações, como testes utilizando redes com outros tamanhos e configurações, matrizes de demanda variada e matrizes sementes que não guardem proporcionalidade direta com a “real”, para só então tecer generalizações. Ainda assim, pode-se afirmar que o método proposto consiste em uma mudança de paradigma na modelagem da matriz OD sintética. Acredita-se que a ideia defendida neste artigo poderá vir a contribuir, na prática, para o processo de reconstrução da matriz OD sintética.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP pela concessão de bolsa de estudo de doutorado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BPR (1964) *Traffic Assignment Manual*. Bureau of Public Roads, Washington, DC, USA.
- Caliper (2005) *Travel Demand Modeling with TransCAD 4.8*. Caliper Corporation, Newton, USA.
- Cascetta, E. e S. Nguyen (1988) A unified framework for estimating or updating origin/destination matrices from traffic counts. *Transportation Research Part B*, v. 18, n. 6, p. 437–455. DOI:10.1016/0191-2615(88)90024-0.
- Glover, F.; J. Hultz e D. Klingman (1977) *Improved computer-based planning techniques*. Relatório número CCS 283, Center for Cybernetic Studies, The University of Texas, Austin, Texas.
- Hazelton, M. L. (2001) Inference for Origin-Destination Matrices: Estimation, Prediction and Reconstruction. *Transportation Research*, v. 35B, p. 667–676. DOI:10.1016/S0191-2615(00)00009-6.
- Hellinga, B. R. (1994) *Estimating dynamic origin - destination demands from link and probe counts*. Dissertação (Mestrado). Department of Civil Engineering, Queen's University.
- Martin, P.T. e M. C. Bell (1992) Network programming to derive turning movements from link flows. *Transportation Research Record*, n. 1365, p. 147–154.
- 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 3.
- Paramahamsan, H. (1999) *Fundamental properties of synthetic O-D generation formulations and solutions*. Mestrado (Dissertação), Civil and Environmental Department, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA. 133 p.
- Pitombeira, A. R. N.; B. V. Bertoincini e C. F. G. Loureiro (2011) Abordagem bayesiana na estimação de matrizes origem-destino sintéticas em redes de transportes. *Anais do XXV Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, Belo Horizonte, MG.
- Timms, P. (2001) A philosophical context for methods to estimate origin-destination trip matrices using link counts. *Transport Reviews*, v. 21, n. 3, p. 269–301. DOI:10.1080/01441640110050076.

- Van Zuylen, H. (1978). The information minimizing method: validity and applicability to transport planning. In. *New Developments in Modeling Travel Demand and Urban Systems*. Edited by G. R. M. Jansen et al. Saxon, Farnborough.
- Van Zuylen, H. J. e L. G. Willumsen (1980) The most likely trip matrix estimated from traffic counts. *Transportation Research Part B*, n. 14, p. 281–293. DOI:10.1016/0191-2615(80)90008-9.
- Willumsen, L. G. (1979) *Estimation of an OD matrix from traffic counts: a review*. Working paper 99, Institute for Transport Studies, University of Leeds.
- Willumsen, L. G. (1981) Simplified transport models based on traffic counts. *Transportation*, n. 10, p. 257–278. DOI:10.1007/BF00148462.