

MODELAGEM DA DEMANDA POR TRANSPORTES UTILIZANDO VARIÁVEIS DUMMIES

Mardel Freitas Braga
Gregório Coelho de Moraes Neto
Adelmo Inácio Bertolde

Universidade Federal Do Espírito Santo
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil Transportes

RESUMO

Este artigo apresenta uma proposta de modelo direto de demanda por transportes, utilizando variáveis *dummies* para identificar os modos de transportes e os propósitos de viagem. Usa como exemplo um modelo que explica a demanda de viagens para os modos coletivo e individual e propósitos trabalho, estudo e outros. Para testar a adequação do modelo proposto utiliza dados da pesquisa realizada no município de Vitória-ES em 1998 para calibrar modelos de demanda de viagens por três métodos diferentes: método sequencial, método direto tradicional e o método direto proposto. Em cada um desses modelos aplica-se os dados de outra pesquisa realizada em 2007 e estima matrizes O-D que, através de estatísticas apropriadas, são comparadas com matrizes O-D observadas no mesmo ano.

ABSTRACT

This article presents a proposal of direct model of demand for transports, using dummies variables to identify each mode and purpose of travel. It uses as an example a model that explains the demand to the collective and personal modes of travel and work, study and others purposes. To test the validation of the proposed model it uses data from research conducted in the city of Vitória-ES in 1998 to calibrate models of travel demand by three different methods: the sequential method, the traditional direct method and the direct method proposed. In each of these models applies the O-D data from other research conducted in 2007 and estimates O-D matrices that through appropriate statistics are compared with the observed O-D matrices in the same year.

1. INTRODUÇÃO

No estudo de planejamento de transportes um dos principais objetivos é modelar a demanda de viagem para que se possa ter um maior grau possível de conhecimento dos movimentos atuais e futuros de viagens. Esse conhecimento permite ao planejador de transportes tomar decisões mais acertadas, evitando assim o excesso ou escassez de oferta de transportes.

Este artigo traz uma proposta para a modelagem de modelos diretos de demanda por transportes utilizando variável *dummy* para separar e identificar cada tipo de viagem. Usa como exemplo um modelo que explica a demanda de viagens para cada combinação dos modos de viagem (coletivo e individual) e propósitos de viagem (a trabalho, a estudo e a outros).

A metodologia para testar a adequação do modelo proposto consiste em utilizar os dados da pesquisa O-D, realizada no município de Vitória-ES em 1998, para calibrar modelos de demanda de viagens por três métodos diferentes: método sequencial (4 etapas), método direto tradicional e o método direto utilizando a técnica de variável *dummy* (proposto). Para cada um desses modelos calibrados são aplicados os dados da pesquisa O-D realizada no município de Vitória-ES em 2007. Dessa forma estimam-se para 2007, matrizes O-D para cada um dos métodos, matrizes estas que, através de estatísticas apropriadas como phi-normalizado, índice de dissimilaridade e erro médio absoluto normalizado, serão comparadas com as matrizes O-D observadas na pesquisa realizada no município de Vitória-ES em 2007.

2. MODELOS DE DEMANDA POR TRANSPORTES

A modelagem da demanda é uma etapa importante do planejamento de transportes que tem por objetivo prever a demanda de viagens futuras utilizando variáveis socioeconômica do uso do solo e do sistema de transporte. Segundo diversos autores, entre eles Manhein (1979), Mello (1975) e Bruton (1975), os modelos de demanda de transportes têm sido classificados em dois grande grupos:

- Modelos de demanda seqüenciais;
- Modelos de demanda diretos, ou simultâneos.

2.1. Modelos Seqüenciais

Os modelos seqüenciais são baseados na hipótese que o processo de decisão de viagem de um indivíduo é desenvolvido em etapas, ou seja, supõe-se primeiramente que o indivíduo decide exercer uma atividade, a seguir decide onde exercer esta atividade, depois escolhe o modo de viagem e por último a rota. Dessa forma, os modelos são desenvolvidos em quatro etapas descritas resumidamente a seguir.

2.1.1. Geração de viagens

A geração de viagens é o ponto de partida de todo o processo e tem como objetivo a previsão do número total de viagens de pessoas que são produzidas e/ou atraídas em cada zona de tráfego da área em estudo.

De acordo com Ortúzar e Willumsen (2001), várias técnicas foram propostas para modelar a geração de viagens desde o início da década de 50. Entre essas técnicas, pode-se citar as do fator de crescimento, taxas de viagens, de classificação cruzada, escolha discreta e regressão linear.

2.1.2. Distribuição de Viagens

Os modelos de distribuição de viagens, sem se preocupar com os meios de transporte e rotas utilizadas, distribuem os totais das projeções de viagens produzidas/atraídas de uma zona de tráfego com as demais zonas, criando uma matriz O-D de viagens futura.

Um dos modelos mais empregado para distribuição de viagens é o modelo gravitacional que, segundo Bruton (1975), pode ser representado por:

$$V_{ij} = P_i \left[\frac{K_{ij} A_j f(c_{ij})}{\sum_x K_{ix} A_x f(c_{ix})} \right] \quad (1)$$

onde V_{ij} : número de viagens com origem em i e destino em j ;

P_i : número de viagens produzidas na zona i ;

A_j : número de viagens atraídas na zona j ;

K_{ij} : fator k entre as zonas i e j ;

c_{ij} : impedância entre a zona i e j ;

$f(c_{ij})$: função de impedância entre as zona i e j .

2.1.3. Divisão Modal

O objetivo dos modelos de divisão modal é alocar aos diferentes modos de transportes as viagens com origem na zona i e destino da zona j , sem se preocupar com as rotas existentes. Segundo Campos (1999), os modelos de divisão modal podem ser classificados em:

- **Determinísticos:** que utilizam métodos quantitativo, como regressão linear, classificação cruzada ou curvas de desvio, para determinar a proporção de viagens para cada modo.
- **Probabilísticos:** que utilizam a probabilidade de escolha de cada modo para determinar a percentagem de viagens para seus respectivos modos. Os modelos mais utilizados são: Logit binomial e Logit multinomial.

2.1.4. Alocação de Tráfego

A alocação de tráfego, última etapa do processo, tem como objetivo alocar os fluxos de cada modo, definido na etapa anterior para cada par de origem e destino, na rede de transportes. Segundo Meyer e Miller (2001), entre as diversas técnicas empregadas para alocação de tráfego pode-se citar: alocação tudo ou nada, alocação com restrição, alocação estocástica e alocação dinâmica. A alocação de tráfego não é objeto de estudo deste artigo, uma vez que o modelo a ser proposto realiza somente as três primeiras etapas.

2.2. Modelos Diretos

Nos modelos de demanda diretos uma única equação explica mais de uma das etapas do modelo seqüencial. Um exemplo é o modelo de Quandt e Baumol apresentado por Papacostas (2000), o qual modela a demanda de viagens interurbanas empregando variáveis do uso do solo variáveis socioeconômicas e variáveis do sistema de transportes. Esse modelo estima a demanda de viagem da origem i para o destino j pelo modo m , ou seja, esse modelo é um modelo direto que modela a geração de viagem, distribuição de viagens e escolha modal. É expresso por:

$$V_{ijm} = a_0 (P_i)^{a_1} (P_j)^{a_2} (C_{ij*})^{a_3} \left(\frac{C_{ijm}}{C_{ij*}} \right)^{a_4} (H_{ij*})^{a_5} \left(\frac{H_{ijm}}{H_{ij*}} \right)^{a_6} \left(\frac{D_{ijm}}{D_{ij*}} \right)^{a_7} (Y_{ij})^{a_8} \quad (2)$$

onde V_{ijm} : quantidade de viagem da zona i , para zona j , pelo modo m ;

P_i e P_j : população de i e j ;

C_{ij*} : menor custo de viagem entre a zona i e j ;

C_{ijm} : custo do modo m ;

H_{ij*} : menor tempo de viagem entre a zona i e j ;

H_{ijm} : tempo de viagem via modo m ;

D_{ij*} : frequência de partida do modo mais freqüente;

D_{ijm} : frequência de partida do modo m ;

Y_{ij} : renda média ponderada de i e j ;

a_0, \dots, a_8 : parâmetros a serem calibrados.

3. MODELO PROPOSTO

O modelo proposto é do tipo direto, baseado no modelo gravitacional, incorpora variáveis socioeconômicas, do sistema de transportes e do uso do solo, e tem por finalidade estimar o número de viagens intra e entre duas macrozonas de tráfego pelo propósito P e modo M , utilizando variáveis *dummies*. A sua formulação geral é dada por:

$$V_{ijm}^P = K \cdot M^{g_1} \cdot P_1^{g_2} \cdot P_2^{g_3} \cdot P_1^{g_4} \cdot P_2^{g_5} \cdot \ln M^{g_6} \cdot \ln P_1^{g_7} \cdot \ln P_2^{g_8} \cdot x_1^{a_1 + b_1 \ln M + c_1 \ln P_1 + d_1 \ln P_2 + e_1 \ln M \ln P_1 + f_1 \ln M \ln P_2} \cdot x_2^{a_2 + b_2 \ln M + c_2 \ln P_1 + d_2 \ln P_2 + e_2 \ln M \ln P_1 + f_2 \ln M \ln P_2} \cdot \dots \cdot x_r^{a_r + b_r \ln M + c_r \ln P_1 + d_r \ln P_2 + e_r \ln M \ln P_1 + f_r \ln M \ln P_2} \quad (3)$$

Para que os parâmetros do modelo possam ser estimados, aplica-se o logarítimo natural em ambos os lados da equação (3), transformando-o em um modelo linear, como é visto em (4).

$$\begin{aligned}
\ln V_{ijm}^p = & \ln K + g_1 \cdot \ln M + g_2 \cdot \ln P_1 + g_3 \cdot \ln P_2 + g_4 (\ln M \cdot \ln P_1) + g_5 (\ln M \cdot \ln P_2) \\
& + a_1 \ln x_1 + b_1 (\ln M \cdot \ln x_1) + c_1 (\ln P_1 \cdot \ln x_1) + d_1 (\ln P_2 \cdot \ln x_1) + \\
& + e_1 (\ln M \cdot \ln P_1 \cdot \ln x_1) + f_1 (\ln M \cdot \ln P_2 \cdot \ln x_1) + \\
& + a_2 \ln x_2 + b_2 (\ln M \cdot \ln x_2) + c_2 (\ln P_1 \cdot \ln x_2) + d_2 (\ln P_2 \cdot \ln x_2) + \\
& + e_2 (\ln M \cdot \ln P_1 \cdot \ln x_2) + f_2 (\ln M \cdot \ln P_2 \cdot \ln x_2) + \dots + \\
& + a_r \ln x_r + b_r (\ln M \cdot \ln x_r) + c_r (\ln P_1 \cdot \ln x_r) + d_r (\ln P_2 \cdot \ln x_r) + \\
& + e_r (\ln M \cdot \ln P_1 \cdot \ln x_r) + f_r (\ln M \cdot \ln P_2 \cdot \ln x_r)
\end{aligned} \quad (4)$$

onde $\ln(k)$; a_i , b_i , c_i , d_i , e_i , f_i , com $i=1,2,\dots,r$; g_1 , g_2,\dots,g_5 , são os parâmetros a serem estimados;
 x_i : variáveis socioeconômicas, uso do solo, sistema de transporte e impedância a serem incluídas no modelo;

M : variável dummie 2 se for modo coletivo, 1 se for modo Individual;

P_1 : variável dummie 2 se o propósito da viagem for a estudo, 1 se for outro qualquer;

P_2 : variável dummie 2 se o propósito da viagem for a trabalho, 1 se for outro qualquer.

Observe que o modelo proposto além de explicar as três primeiras etapas do método sequencial, também explica os propósitos das viagens. Outras classificações de viagens poderiam ser incluídas no modelo, pela inclusão de outras variáveis *dummies*.

Encontrado os parâmetros da equação 4, aplicando o antilogaritmo em ambos os lados da equação, obtém-se o modelo proposto estimado (5).

$$\begin{aligned}
\hat{V}_{ijm}^p = & \hat{K} \cdot \hat{M}^{\hat{g}_1} \cdot \hat{P}_1^{\hat{g}_2} \cdot \hat{P}_2^{\hat{g}_3} \cdot \hat{P}_1^{\hat{g}_4} \cdot \hat{P}_2^{\hat{g}_5} \cdot \hat{x}_1^{\hat{a}_1 + \hat{b}_1 \ln M + \hat{c}_1 \ln P_1 + \hat{d}_1 \ln P_2 + \hat{e}_1 \ln M \ln P_1 + \hat{f}_1 \ln M \ln P_2} \\
& \cdot \hat{x}_2^{\hat{a}_2 + \hat{b}_2 \ln M + \hat{c}_2 \ln P_1 + \hat{d}_2 \ln P_2 + \hat{e}_2 \ln M \ln P_1 + \hat{f}_2 \ln M \ln P_2} \dots \hat{x}_r^{\hat{a}_r + \hat{b}_r \ln M + \hat{c}_r \ln P_1 + \hat{d}_r \ln P_2 + \hat{e}_r \ln M \ln P_1 + \hat{f}_r \ln M \ln P_2}
\end{aligned} \quad (5)$$

Substituindo os valores das variáveis *dummies* na equação (5), pode-se obter modelos específicos para cada combinações de modo (Coletivo e Individual) e propósito de viagem (Trabalho, Estudo e Outros) como é mostrado no Quadro 1. Observe que cada modelo da combinação modo e propósito terá seus respectivos parâmetros, que através de testes estatísticos, poderão ter suas significâncias verificadas ou não.

Quadro 1: Modelos de demanda de viagens originados do modelo proposto (4)

Modo	Propósito	Modelo
Coletivo	Trabalho	$\hat{V}_{ijC}^T = \hat{K} \cdot 2^{\hat{g}_1 + \hat{g}_3 + \hat{g}_5 \ln 2} \cdot \hat{x}_1^{\hat{a}_1 + \hat{b}_1 \ln 2 + \hat{c}_1 \ln P_2 + \hat{d}_1 (\ln 2)^2} \cdot \hat{x}_2^{\hat{a}_2 + \hat{b}_2 \ln 2 + \hat{c}_2 \ln 2 + \hat{d}_2 (\ln 2)^2} \dots \hat{x}_r^{\hat{a}_r + \hat{b}_r \ln 2 + \hat{c}_r \ln P_2 + \hat{d}_r (\ln 2)^2}$
	Estudo	$\hat{V}_{ijC}^E = \hat{K} \cdot 2^{\hat{g}_1 + \hat{g}_2 + \hat{g}_4 \ln 2} \cdot \hat{x}_1^{\hat{a}_1 + \hat{b}_1 \ln 2 + \hat{c}_1 \ln 2 + \hat{e}_1 (\ln 2)^2} \cdot \hat{x}_2^{\hat{a}_2 + \hat{b}_2 \ln 2 + \hat{c}_2 \ln 2 + \hat{e}_2 (\ln 2)^2} \dots \hat{x}_r^{\hat{a}_r + \hat{b}_r \ln 2 + \hat{c}_r \ln 2 + \hat{e}_r (\ln 2)^2}$
	Outros	$\hat{V}_{ijC}^O = \hat{K} \cdot 2^{\hat{g}_1} \cdot \hat{x}_1^{\hat{a}_1 + \hat{b}_1 \ln 2} \cdot \hat{x}_2^{\hat{a}_2 + \hat{b}_2 \ln 2} \dots \hat{x}_r^{\hat{a}_r + \hat{b}_r \ln 2}$
Individual	Trabalho	$\hat{V}_{ijI}^T = \hat{K} \cdot 2^{\hat{g}_3} \cdot \hat{x}_1^{\hat{a}_1 + \hat{d}_1 \ln 2} \cdot \hat{x}_2^{\hat{a}_2 + \hat{d}_2 \ln 2} \dots \hat{x}_r^{\hat{a}_r + \hat{d}_r \ln 2}$
	Estudo	$\hat{V}_{ijI}^E = \hat{K} \cdot 2^{\hat{g}_2} \cdot \hat{x}_1^{\hat{a}_1 + \hat{c}_1 \ln 2} \cdot \hat{x}_2^{\hat{a}_2 + \hat{c}_2 \ln 2} \dots \hat{x}_r^{\hat{a}_r + \hat{c}_r \ln 2}$
	Outros	$\hat{V}_{ijI}^O = \hat{K} \cdot \hat{x}_1^{\hat{a}_1} \cdot \hat{x}_2^{\hat{a}_2} \dots \hat{x}_r^{\hat{a}_r}$

Observe que nos modelos gerados do modelo proposto as variáveis explicativas têm pesos diferentes para cada combinação de modo e propósito de viagem.

4. APLICAÇÃO DOS MODELOS

Para validar a modelagem proposta, inicialmente foram utilizados dados de pesquisa origem-destino (O-D) realizada em 1998 na região metropolitana de Vitória-ES. Tais dados foram utilizados para estimar e calibrar os modelos sequenciais, os diretos tradicionais e o direto proposto, com vista à obtenção do número de viagens com origem e destino em treze macrozonas do município de Vitória-ES, pelo modo coletivo (ônibus, van, e barco) e Individual (automóvel, caminhão e motocicleta) e pelos propósitos Trabalho, Estudo e Outros. A seguir, os modelos calibrados foram aplicados, com dados de outra pesquisa realizada em 2007. Finalmente, os resultados das aplicações dos modelos foram comparados com os observados nas mesmas pesquisas de 2007.

4.1. Área de Estudo

Na pesquisa O-D realizada em 1998, o município de Vitória-ES foi dividido em 39 zonas, e na pesquisa de 2007 em 85 zonas, que foram agrupadas em 13 macrozonas, levando em consideração características socioeconômicas da demanda por transportes consagradas nas práticas de modelagem de transportes urbanos: população, renda, empregos, matrículas escolares e posse de automóveis. Pelo fato das zonas de estudo em 1998 e 2007 não serem as mesmas, houve a necessidade de compatibilizar as pesquisas de 1998 com as de 2007 de forma que as macrozonas de 1998 fossem iguais a de 2007, ficando a área de estudo composta por 13 macrozonas e uma área verde, como mostra a Figura 1, e os dados socioeconômicos, como mostrado nos Quadros 2 e 3 .

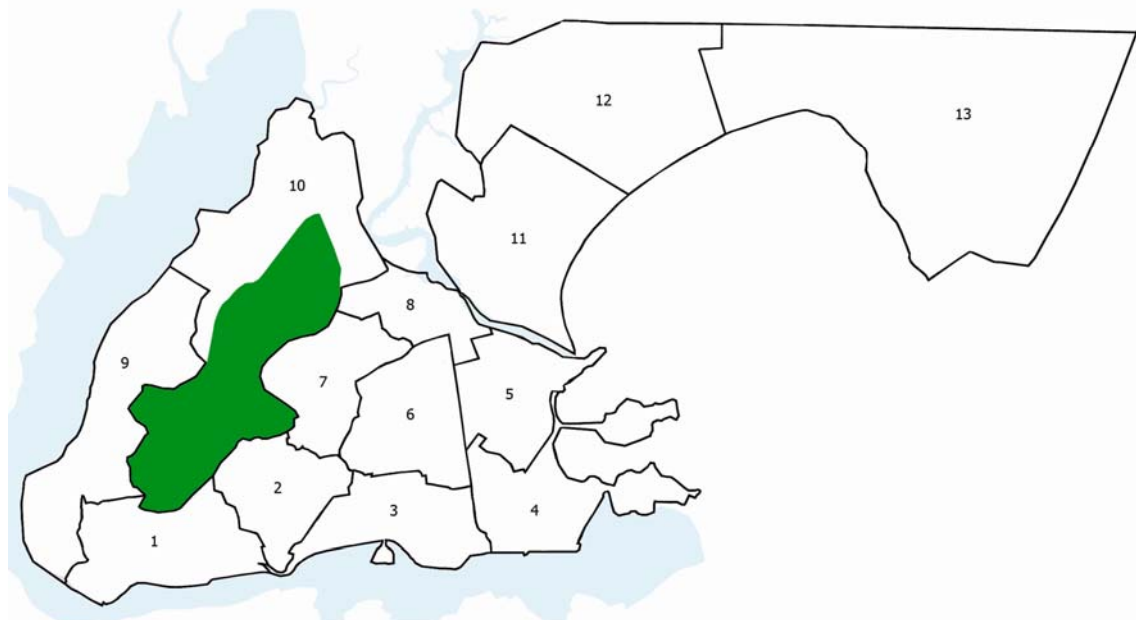


Figura1: Área de estudo do município de Vitória-ES.

Quadro 2: Variáveis socioeconômicas do município de Vitória-ES em 1998

Macro-Zona	População	Área (Km ²)	Densidade (Pes./km ²)	Automóvel	Renda (S.M.)	Oferta de Emprego	Oferta de Matrículas Escolares	População de Estudantes	População de Ocupados
1	31729	4,31	7362,06	11272	4,01	49141	19988	9090	12028
2	10934	2,87	3805,49	2838	3,24	7742	11394	2569	4050
3	17916	4,31	4157,01	5163	4,03	17697	9576	5102	6873
4	6475	5,75	1126,74	4887	5,79	11008	3757	1854	2720
5	16722	4,31	3879,92	6523	6,71	20936	11664	5104	6722
6	35309	4,31	8192,58	3390	2,41	6505	3708	9435	13463
7	7131	4,31	1654,69	532	3,39	685	810	2205	2721
8	7367	2,87	2563,86	808	1,95	2791	1326	2072	2734
9	24209	7,18	3370,31	1379	1,89	2528	3585	7105	8069
10	26111	7,18	3635,04	808	0,98	2317	4690	9115	8580
11	37299	7,18	5192,68	7370	4,79	10745	8668	13245	13491
12	16670	10,06	1657,62	296	2,24	2844	3880	4057	5703
13	32039	20,11	1593,00	3035	3,17	8743	6360	8971	11534
Total	269911	84,76		48301		143683	89405	79925	98688

Fonte: dados estimados pelo autor apartir da pesquisa O-D de 1998

Quadro 3: Variáveis socioeconômicas do município de Vitória-ES em 2007

Macro-Zona	População	Área (Km ²)	Densidade (Pes./km ²)	Automóvel	Renda (S.M.)	Oferta de Emprego	Oferta de Matrículas Escolares	População de Estudantes	População de Ocupados
1	37434	4,31	8685,78	7568	3,19	44652	6022	8630	15701
2	12900	2,87	4489,73	7703	3,12	7356	6471	2439	5287
3	21137	4,31	4904,46	9189	3,73	27746	17523	4844	8971
4	7639	5,75	1329,33	9595	5,58	21681	4236	1760	3550
5	19728	4,31	4577,53	10000	5,04	28263	6807	4845	8775
6	41657	4,31	9665,63	7433	2,78	12002	3684	8956	17574
7	8414	4,31	1952,21	6622	2,64	9464	3909	2093	3552
8	8691	2,87	3024,84	4865	2,68	6195	2459	1967	3569
9	28562	7,18	3976,30	5135	1,86	5420	4769	6745	10533
10	30806	7,18	4288,63	12703	1,81	5420	8481	8653	11200
11	44006	7,18	6126,34	12298	4,87	20132	17411	12574	17611
12	19667	10,06	1955,67	10946	2,71	8130	5910	3852	7444
13	37800	20,11	1879,43	20136	2,92	18584	5910	8516	15056
Total	318442	84,76		124193		215045	93592	75875	128823

Fonte: dados estimados pelo autor apartir da pesquisa O-D de 2007

A impedância a ser considerada neste estudo é o tempo de viagem porta a porta em minutos pelo modo motorizado (Coletivo ou Individual), determinado com base nos dados das pesquisas O-D de 1998 e 2007 como sendo o tempo médio que um morador da macrozona *i* leva para chegar no seu destino na macrozona *j*.

4.2. Modelos Sequenciais

4.2.1. Produção e Atração de Viagens

Para a primeira etapa do modelo sequencial, que consiste no processo de geração de viagens, foi utilizada a regressão linear pelo método de stepwise, utilizando somente variáveis explicativas não correlacionadas ao nível de significância de 1% mostrado no Quadro 4, com objetivo de encontrar um modelo de produção da macrozona *i* e de atração da macrozona *j* para cada propósito de viagem (Trabalho, Estudo e Outros). O Quadro 5 apresenta os modelos com seus respectivos R^2 .

Quadro 4: Matriz de correlação das variáveis socioeconômicas do município de vitória-E.S em 1998 e seus respectivo valor-p.

	Pop.	Área	Dens.	Automóvel	Renda	Oferta Emp	Oferta Matr	Pop. Ocup.	Pop. Est.
Pop.	1,000	0,395 0,182	0,655 0,015	0,415 0,159	-0,133 0,665	0,291 0,334	0,341 0,255	0,972** 0,000	0,993** 0,000
Área	0,395 0,182	1,000	-0,371 0,212	-0,156 0,661	-0,142 0,643	-0,165 0,59	-0,134 0,662	0,348 0,244	0,352 0,238
Dens.	0,655 0,015	-0,371 0,212	1,000	0,575 0,040	-0,006 0,985	0,527 0,064	0,535 0,060	0,598 0,031	0,703** 0,007
Automovel	0,415 0,159	-0,156 0,661	0,575 0,040	1,000	0,659 0,014	0,907 0,020	0,851 0,015	0,420 0,153	0,487 0,092
Renda	-0,133 0,665	-0,142 0,643	-0,006 0,985	0,659 0,014	1,000	0,475 0,101	0,432 0,140	-0,089 0,773	-0,051 0,868
Oferta Emp	0,291 0,334	-0,165 0,59	0,527 0,064	0,907 0,020	0,475 0,101	1,000	0,902 0,011	0,250 0,411	0,357 0,232
Oferta Matr	0,341 0,255	-0,134 0,662	0,535 0,060	0,851 0,015	0,432 0,140	0,902 0,011	1,000	0,312 0,299	0,389 0,189
Pop. Ocup.	0,972** 0,000	0,348 0,244	0,598 0,031	0,420 0,153	-0,089 0,773	0,250 0,411	0,312 0,299	1,000	0,955** 0,000
Pop. Est.	0,993** 0,000	0,352 0,238	0,703** 0,007	0,487 0,092	-0,051 0,868	0,357 0,232	0,389 0,189	0,955** 0,000	1,000

**Correlação é significativa ao nível de 1%

Quadro 5: Modelos de produção e atração de viagens

	Propósito	Modelo	R ²	Coefficientes	Estatística t	Valor-P
Produção	Trabalho	$VPT_i = 1,53Aut_{.i} - 173Renda_i + 0,269Pop.Ocup_{.i}$	0,94	Aut _{.i}	2,98	0,014
				Renda _i	7,18	0,000
				Pop. Ocup _{.i}	-2,28	0,040
	Estudo	$VPE_i = 584Renda_i + 0,367Pop.Est_{.i}$	0,70	Renda _i	3,15	0,009
				Pop.Est _{.i}	2,68	0,021
	Outros	$VPO_i = 0,159Dens_{.i} + 0,411Aut_{.i}$	0,97	Dens _{.i}	13,84	0,000
Atração	Trabalho	$VAT_j = 0,698Oferta\ de\ emprego_j$	0,98	Aut _{.i}	4,69	0,001
				Ofeta de Emprego _j	49,15	0,000
		$VAE_j = 0,564Oferta\ de\ matricula\ Escolar_j$		Oferta de Matricula Escolar _j	9,18	0,000
	Outros	$VAO_j = Exp(-4,55)Oferta\ de\ Emprego_j^{1,3}$	0,93	Constante	-4,96	0,000
				Ofeta de Emprego _j	12,55	0,000

4.2.2. Distribuição de Viagens

De posse das estimativas de viagens produzidas e atraídas para todos os propósitos de viagem, em estudo, da matriz de impedância conjunta de viagens em 1998, e com auxilio do *software* TransCAD (Caliper, 2005a) e suas rotinas de calibração e distribuição (Caliper, 2005b), foi calibrado o modelo gravitacional dado por:

$$V_{ij} = P_i \left[\frac{A_j 2,94 t_{ij}^{-1,28} e^{-0,09 t_{ij}}}{\sum_x A_x 2,94 t_{ix}^{-1,28} e^{-0,09 t_{ix}}} \right] \quad (6)$$

onde V_{ij} : número de viagens com origem em i e destino em j ;
 P_i : número de viagens produzidas na zona i ;
 A_j : número de viagens atraídas na zona j ;
 t_{ij} : tempo de viagem entre a zona i e j ;

4.2.3. Divisão Modal

Devido à insuficiência de dados para utilização de métodos probabilísticos, a divisão modal foi realizada pelo método determinístico, utilizando a regressão linear, pelo método de *stepwise*, com objetivo de encontrar modelos com variáveis que expliquem a escolha do modo individual. Como se trata apenas de dois modos de viagens, Coletivo e Individual, estimada a proporção de viagem para individual, a proporção do modo coletivo é dado pelo seu complemento ($PV_C = 1 - PV_I$). Após a análise de todas as equações geradas pelo método *stepwise*, chegou-se nos três melhores modelos apresentado no Quadro 6.

Quadro 6: Modelos de divisão modal para o modo individual

Modo	Propósito	Modelo	R ²	Coeficientes	Estatística t	Valor-P
Individual	Trabalho	$PVTI_{ij} = 0,5 - 0,014t_{ijI} + 0,1Renda_i$	0,483	Intercepto	5,390	0,000
				t_{ijI}	-5,500	0,000
				Renda _i	8,500	0,000
	Estudo	$PVEI_{ij} = 0,49 - 0,011t_{ijI} + 0,064Renda_i$	0,224	Intercepto	3,830	0,000
				t_{ijI}	-3,750	0,000
				Renda _i	3,170	0,002
	Outros	$PVOI_{ij} = 0,56 - 0,010t_{ijC} + 0,096Renda_i$	0,263	Intercepto	2,870	0,005
				t_{ijC}	-2,200	0,030
				Renda _i	4,740	0,000

Observando no Quadro 6 o valor-p do teste t dos coeficientes e sabendo que o valor-p de todos os três modelos é 0,00. Conclui-se que os três modelos são explicativos, apesar do R² serem baixos.

4.3. Modelo Direto Tradicional

O modelo direto tradicional foi calibrado com o auxílio do *software* Minitab 15 (Minitab, 2005), utilizando a técnica de *stepwise* (veja Freire e Charnet 1999), para gerar alguns modelos. O critério para a escolha do melhor modelo consistiu em escolher o modelo com melhor índice de determinação (R²) e que obedecesse todos os critérios necessário para a calibração de um modelo de regressão linear (normalidade dos erros, homocedasticidade). Adotando um nível de significância de 5% para os testes dos coeficientes, chegou-se no modelo abaixo, com um índice de determinação de R² = 0,35:

$$V_{ijm}^p = \exp(-17,84) \text{pop}_i^{0,694} \text{pop}_j^{-0,662} t_{ijm}^{-0,607} \left(\frac{\text{pop}_{pi}}{\text{Pop}_i} \right)^{0,241} OE_j^{1,21} OM_j^{0,825} Aut_i^{0,83} \quad (7)$$

onde V_{ijm}^p = viagens com origem na macrozona i, destino na macrozona j, pelo modo m e com propósito p;

pop_i: população da macrozona i;

pop_j: população da macrozona j;

t_{ijm}: tempo de viagem de i para j pelo modo m;

pop_{pi}: população da macrozona i que realiza a atividade p;

OE_j: oferta de emprego na macrozona j;

OM_j: oferta de matrículas escolares na macrozona j;

Aut_i: número de automóveis na macrozona i.

4.4. Modelo Direto Proposto

Tendo como base a formulação proposta e com o auxílio do *software* estatístico Minitab 15, foram realizadas análises de regressão pelo método *Stepwise* para encontrar modelos para explicar o número de viagens. O critério de escolha do melhor modelo foi o de melhor índice de determinação que obedecesse a todos os requisitos de um bom modelo de regressão linear (normalidade dos erros, homocedasticidade). Adotando um nível de significância de 5% para os testes dos coeficientes, chega-se assim no modelo abaixo, com um índice de determinação de $R^2 = 0,50$:

$$\ln(V_{ijm}) = -22,31 + 0,64P_1 - 2,43\ln(t_{ijm}) + 1,92\ln(M)\ln(t_{ijm}) + 1,38\ln(Pop_i) + 1,29\ln(OE_j) + 0,46\ln(P_2)\ln(OE_j) + 0,35\ln(OM_j) + 0,0001\ln(P_1)\ln(OM_j) + 2,21\ln(Renda_i) - 4,51\ln(M)\ln(Renda_i) + 2,47\ln(M)\ln(P_1)\ln(Renda_i) \quad (8)$$

Aplicando a exponencial em ambos os lados da equação, chega-se no modelo (9).

$$V_{ijm}^P = \exp(-22,31)P_1^{0,64} \frac{Pop_i^{1,38}OE_j^{1,29+0,46\ln P_2}OM_j^{0,35+0,0001\ln P_1}Renda_i^{2,21-4,51\ln M+2,47\ln M\ln P_1}}{t_{ij}^{2,43-1,92\ln M}} \quad (9)$$

onde V_{ijm}^P : viagens com origem em i , destino em j , pelo modo m e com propósito p ;

Pop_i : População da macrozona i ;

OE_j : emprego ofertado na macrozona j ;

OM_j : densidade populacional da macrozona j ;

$Renda_i$: renda média em salários mínimos da macrozona i ;

t_{ijm} : tempo de viagem em minutos da macrozona i para macrozona j ;

M : variável *dummie* 2 se for modo Coletivo, 1 se for modo Individual;

P_1 : variável *dummie* 2 se o propósito da viagem for a estudo, 1 se for outro qualquer;

P_2 : variável *dummie* 2 se o propósito da viagem for a trabalho, 1 se for outro qualquer.

Substituindo no modelo todas as combinações de *dummies* que representem os modos e propósitos de viagem, chega-se nos modelos apresentados no Quadro 7.

Quadro 7: Modelos de demanda de viagens originados do modelo direto proposto

Modo	Propósito	Modelo
Coletivo	Trabalho	$V_{ijC}^T = \exp(-22,31) \frac{Pop_i^{1,38}OE_j^{1,61}OM_j^{0,35}Renda_i^{-0,92}}{t_{ijC}^{1,10}}$
	Estudo	$V_{ijC}^E = \exp(-22,31)2^{0,64} \frac{Pop_i^{1,38}OE_j^{1,29}OM_j^{0,35007}Renda_i^{0,27}}{t_{ijC}^{1,10}}$
	Outros	$V_{ijC}^O = \exp(-22,31) \frac{Pop_i^{1,38}OE_j^{1,29}OM_j^{0,35}Renda_i^{2,21}}{t_{ijC}^{1,10}}$
Individual	Trabalho	$V_{ijI}^T = \exp(-22,31) \frac{Pop_i^{1,38}OE_j^{1,61}OM_j^{0,35}Renda_i^{2,21}}{t_{ijI}^{2,43}}$
	Estudo	$V_{ijI}^E = \exp(-22,31)2^{0,64} \frac{Pop_i^{1,38}OE_j^{1,29}OM_j^{0,35007}Renda_i^{2,21}}{t_{ijI}^{2,43}}$
	Outros	$V_{ijI}^O = \exp(-22,31) \frac{Pop_i^{1,38}OE_j^{1,29}OM_j^{0,35}Renda_i^{2,21}}{t_{ijI}^{2,43}}$

Observe que os modelos apresentados no Quadro 7 têm a forma de um modelo gravitacional, com a vantagem de ter a possibilidade de inclusão de variáveis socioeconômicas, uso do solo, e do sistema de transportes.

5. AVALIAÇÃO DO MODELO PROPOSTO

O desempenho do modelo proposto foi avaliado por medidas de similaridade que medem a proximidade da matriz O-D observada com as matrizes estimadas pelos modelos utilizados, todas tradicionalmente utilizadas por diversos autores, entre eles Smith e Hutchinson (1981), e Gonçalves e Neto (1993), são elas:

- Phi-Normalizado (PHI): mede a proximidade entre uma matriz de viagens observada e outra estimada. Quanto menor for seu valor, melhor é a matriz estimada.
- Índice de Dissimilaridade (ID): mede a porcentagem de viagens que devem ser realocadas entre os pares (i,j), para que a matriz observada coincida com a matriz estimada. Quanto menor for seu valor, melhor é a matriz estimada.
- Erro Médio Absoluto Normalizado (EMAN): mede a média dos erros absolutos. Dessa forma quanto menor for o valor de EMAN, mais próxima a matriz estimada esta da matriz observada.

O Quadro 8 apresenta os valores das estatísticas de similaridade PHI, ID e EMA das comparações das matrizes O-D estimadas pelos modelos seqüencial, direto tradicional e direto com utilização de variáveis *dummies* (proposto), com as matrizes O-D observadas, para cada combinação de modo e propósito de viagens.

Quadro 8: Estatísticas de similaridade entre matrizes O-D estimadas e observadas

Método	Modo	Propósito	Estatística		
			PHI	ID	EMAN
Seqüencial	Coletivo	Trabalho	0,74	55,10	186,24
	Coletivo	Estudo	1,45	42,45	143,49
	Coletivo	Outros	1,35	41,25	278,87
	Individual	Trabalho	0,71	44,85	151,60
	Individual	Estudo	1,13	45,64	154,26
	Individual	Outros	1,54	45,71	154,50
Direto Tradicional	Coletivo	Trabalho	1,68	40,73	137,66
	Coletivo	Estudo	2,76	45,74	154,61
	Coletivo	Outros	1,59	69,70	235,60
	Individual	Trabalho	1,52	37,39	126,37
	Individual	Estudo	2,27	51,15	172,90
	Individual	Outros	2,01	49,44	167,11
Proposto	Coletivo	Trabalho	1,01	38,72	130,87
	Coletivo	Estudo	1,69	41,93	141,73
	Coletivo	Outros	3,62	49,38	166,90
	Individual	Trabalho	0,91	44,26	149,59
	Individual	Estudo	2,52	45,56	153,99
	Individual	Outros	3,66	45,60	154,13

Observa-se que:

- Com relação á estatística PHI, o método seqüencial apresentou resultados um pouco melhores do que os dos outros dois métodos; os métodos direto tradicional e o proposto apresentaram desempenho idênticos, tendo cada um três casos favoráveis.

- Com relação a estatística ID, o método direto tradicional apresenta um melhor desempenho do que o método sequencial; o método proposto apresenta um melhor desempenho do que o método direto tradicional e o método sequencial, pois apresentou ID menor, salvo no modo Coletivo e propósito Outros, onde o método sequencial mostrou melhor desempenho.
- Na estatística EMAN, o método direto tradicional apresentou um melhor desempenho em relação ao método sequencial, salvo no modo Coletivo e propósito Estudo; e o método proposto apresentou um melhor desempenho em relação aos dois métodos direto tradicional e sequencial, salvo no modo Individual e propósito Trabalho, no qual o método tradicional obteve um erro médio menor.

6. CONCLUSÃO

A hipótese básica de estudo foi confirmada, pois o modelo de demanda de viagem proposto apresentou em geral EMAN e ID menores que os outros dois modelos, indicando que as estimações obtidas pelo método proposto apresentaram erros médios menores e uma maior aproximação com as matrizes observadas. Isso se deve, entre outros, aos fatos do modelo ser direto, evitando assim o problema de propagação de erros, e de incluir variáveis *dummies* fazendo distinção entre modos e propósito de viagem, evitando assim que variações de um tipo de viagem não afete a outros.

Espera-se, portanto, que a inclusão de outras variáveis *dummies* no modelo proposto, tais como modos ou propósitos de viagens, classificações de viagens em horários e dias e etc., possa produzir resultados ainda melhores, além de possibilitar uma modelagem mais rápida em relação aos modelos diretos tradicionais e o sequencial.

Cabe finalmente observar que, caso não houvesse necessidade de compatibilização da pesquisa de 1998 e 2007, os modelos poderiam, eventualmente, ter gerado melhores resultados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bruton, M.J. (1979) Introdução ao Planejamento dos Transportes. Editora Interciência, Rio de Janeiro.
- Caliper (2005a) TransCAD user's Guide, Caliper Corporation, USA.
- Caliper (2005b) Travel Demand Modeling with TransCAD 4.8. Caliper Corporation, USA.
- Freire, C. A., Charnet E. M. (1999) Análise de Modelos de Regressão Linear com Aplicações. Editora da Unicamp, São Paulo.
- Gonçalves, M. B.; Neto, U. I. (1993) Análise Comparativa do Desempenho de alguns Modelos de Distribuição de Viagens usados para Estimar Fluxos Intermunicipais de Passageiros. *Anais do VII Encontro Nacional da ANPET*. São Paulo - SP, Vol. I, p.337-348.
- Manhein, M. L. (1979). Fundamentals of Transportation System Analysis: Volume 1 - Basic concepts. The MIT Press, Cambridge, Mass. USA.
- Mello, J.C. (1975) Planejamento de Transportes. Mc Graw-Hill do Brasil, São Paulo.
- Meyer, D.M.; Miller E.J.(2001) Urban Transportation Planning. Editora McGraw-Hill, New York, USA.
- Minitab (2005) User's Guide Minitab. Corporation, USA.
- Novaes, A. G. (1986). Sistemas de Transportes: Vol. 1-Análise de Demanda. Editora Edgard Blücher, São Paulo.
- Ortúzar, J.D., Willumsen, L.G. (2001) Modelling Transport. John Wiley & Sons, Chichester, England.
- Papacostas, C. S.; Prevedouros P.D (2000) Fundamentals of Transportation Engineering (3ª ed) Prentice- Hall, New Jersey, USA.
- Smith, D. P., Hutchinson, B. G. (1981). Goodness of Fit Statistics for Trip Distribution Models. *Transportation Research*, 15A, p.295-303.
- Campos, V.B.G. (1997) Modelos de Planejamento de Transportes. Apostila Instituto Militar de Engenharia Rio de Janeiro.