

Uma avaliação do consumo de energia por transportes nas capitais brasileiras



Antônio Néelson Rodrigues da Silva
Professor da Escola de Engenharia de São Carlos da USP
E-mail: anelson@sc.usp.br

Guilherme Camargo Ferraz Costa
Aluno do programa de Pós-graduação em Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos da USP

Vânia Maria Pessoa Pampolha
Engenheira da Companhia de Engenharia de Tráfego de São Paulo - CET

A dispersão das atividades urbanas está diretamente associada com a dependência da população quanto ao transporte. Foi através da evolução dos meios de transportes que se chegou à configuração espacial hoje existente nas principais cidades brasileiras. Em virtude disso, as atividades mais usuais da população (como trabalho, estudo, lazer, compras etc.) e as suas localizações geram viagens com características específicas quanto ao itinerário, modo de transporte e horário.

Dependendo da forma como as cidades se desenvolvem, principalmente em relação a alguns aspectos de natureza física, pode-se ter maior ou menor gasto de energia para realizar as viagens necessárias ao meio urbano, decorrência do uso do automóvel ou do transporte coletivo.

A difusão do uso do automóvel induziu à urbanização acelerada e desordenada, desfavorável à racionalização e economia no emprego do combustível. Este aspecto tem fomentado inúmeros debates na literatura nacional e internacional sobre planejamento urbano, inclusive a uma discussão acerca da hipótese de que a densidade urbana tem significativa influência no consumo de energia. Este consumo pode ser medido, em parte, pelo combustível que é gasto com os meios de transportes utilizados no meio urbano.

De forma a contribuir para estes debates, o objetivo principal deste trabalho é analisar a situação atual das capitais brasileiras quanto à sua configuração espacial e ao seu consumo de energia com transportes. Para tal, procura-se identificar como algumas variáveis relacionadas à forma urbana interferem com o gasto com energia para transportes nestas cidades.

O desenvolvimento do trabalho se dá da seguinte forma: o próximo item mostra uma breve revisão de literatura sobre o impacto de cidades (e/ou regiões) mais ou menos adensadas no consumo de energia



com os transportes. Em seguida é feita uma breve descrição da abordagem desenvolvida para tentar identificar os elementos, notadamente os de natureza espacial, que interferem no consumo de energia com transportes urbanos nas capitais brasileiras. Por fim, encontram-se as principais conclusões derivadas deste trabalho, seguidas por uma lista da bibliografia citada no texto.

ESPALHAMENTO URBANO E CONSUMO DE ENERGIA COM TRANSPORTE

O processo de urbanização neste século apresenta significativas alterações na forma dos centros urbanos. Entre estas alterações, o espalhamento urbano pode ser citado como uma das mais importantes. Diversas são as formas de defini-lo e numerosas são as maneiras que podem caracterizá-lo.

De acordo com Silva (1993); o espalhamento urbano pode ocorrer como consequência de dois processos:

- baixas densidades em zonas residenciais, resultantes de grandes lotes individuais;
- descontinuidade na ocupação do solo urbano.

Uma das formas de medir o espalhamento urbano ou o grau de descentralização das cidades é através da densidade populacional. Densidade urbana é a população dividida pelo total de área ocupada por uma cidade, excluindo todos os usos não urbanos de solo (Newman & Hogan, 1981). Consideram-se como baixas densidades aquelas cujos valores são menores do que 25 habitantes/ha e altas densidades os valores superiores a 100 habitantes/ha. O mundo atual apresenta um declínio nos valores de densidades urbanas, especialmente em continentes como a América do Norte, Austrália e Europa. As maiores densidades têm sido observadas em cidades do terceiro mundo e em alguns centros urbanos da Europa.

O uso do carro como modo de transporte tem influenciado os valores de densidade. Quanto mais densa é a zona, menor é a posse de carro. A posse de carro por pessoa aumenta mais rápido em zonas com densidades mais baixas. Segundo Fouchier (1997), em Paris o crescimento foi cerca de seis a sete vezes maior em zonas com baixas densidades, quando comparado com aquele de zonas com altas densidades. Uma observação interessante é que lá mais de 1/3 das famílias não possuem carro. A posse de carro observada foi duas vezes mais sensível à densidade do que a distância ao centro da cidade. A observação complementar de que os indivíduos que moram em regiões com menores densidades viajam diariamente 2,3 vezes mais (em distância) do que aqueles que moram em zonas mais densas (35 km con-

tra 15 km) reforça a hipótese de que a posse do automóvel contribui para o espalhamento das cidades, ao influenciar na localização de moradia e emprego das pessoas.

Estudos mais recentes sobre o tema podem ser encontrados em Newman & Kenworthy (1999), Kenworthy & Laube (1999) e Kenworthy et al. (2000).

O consumo de energia do transporte urbano

Embora em geral não haja estatísticas precisas sobre o gasto de energia urbana, cidades que possuem um planejamento orientado com prioridades para o transporte público e redução no consumo de combustível possuem menor dependência do transporte privado (automóvel) e são mais econômicas. Altas densidades reduzem o consumo de energia e poluem menos.

O trabalho de Newman & Kenworthy (1989), desenvolvido para 32 cidades de diversos países, mostrou que o uso de gasolina é menor em cidades com altas densidades populacionais, quando comparadas com as de baixas densidades. Ou seja, que o custo com transporte é menor, quanto mais densa é a cidade. A cidade de Hong-Kong, por exemplo, que apresenta um dos consumos de energia para transportes mais baixos das cidades estudadas (figura 1), possui a maior densidade observada, com cerca de 300 habitantes/hectare. Na sua área central, a densidade chega a ser próxima a 1.000 habitantes/hectare.

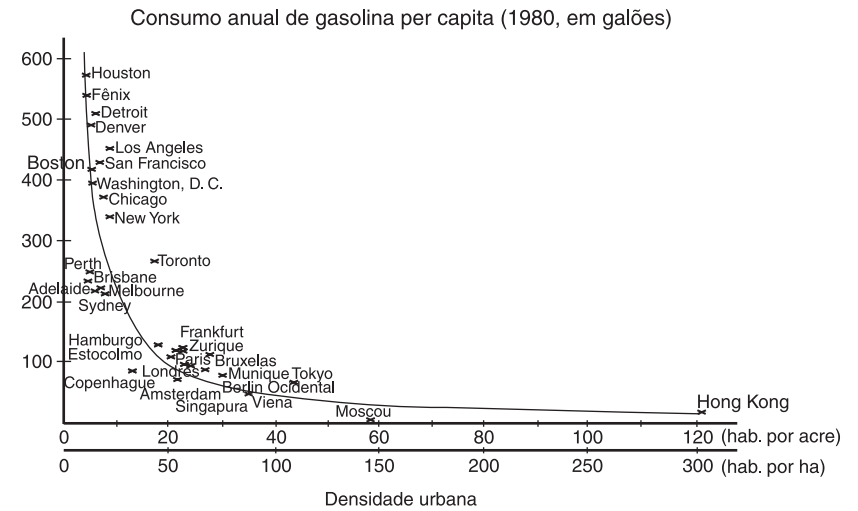
A pesquisa mostrou que as cidades dos EUA consumiam quase o dobro da quantidade consumida pelas cidades australianas, um pouco menos do que o dobro da gasolina utilizada em Toronto, quatro vezes o gasto médio de gasolina utilizada em três cidades asiáticas. Foram encontradas ainda significativas correlações entre o uso de gasolina e o seu preço, a renda per capita e a eficiência energética do veículo. Segundo aqueles autores, a estrutura urbana é a principal justificativa para explicar os padrões no uso de gasolina e a dependência do automóvel.

Em pesquisa realizada em 97 cidades da Suécia, Næss (1993, apud Næss et al., 1996) também observou que o uso de energia com transporte é influenciado pela densidade da população. Quando a área urbana per capita aumentou de 400 para 600 m², o uso de energia médio anual gasto com transporte aumentou cerca de 12%.

Já em Næss (1995), o propósito da pesquisa, cujos principais resultados aparecem na figura 2 (juntamente com aqueles obtidos por Newman & Kenworthy, em 1989), foi investigar as relações entre as variáveis relacionadas à forma urbana e o uso de energia com transporte em 22 cidades nórdicas (13 na Noruega, quatro na Suécia, quatro na Dinamarca e uma na Islândia).

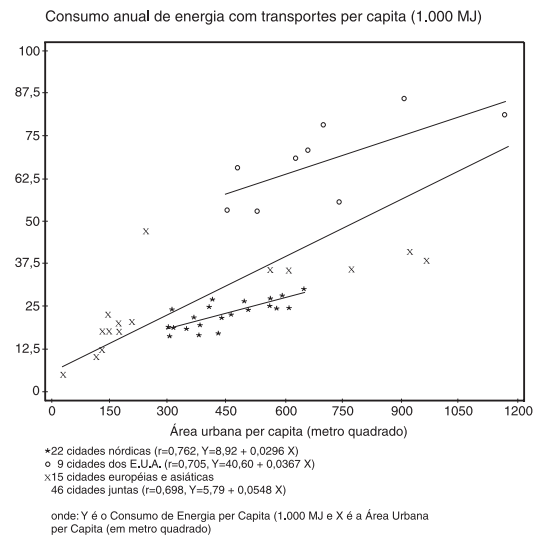


Figura 1
Consumo de gasolina per capita versus densidade urbana



Fonte: Newman & Kenworthy (1989, p. 31).

Figura 2
Consumo anual de energia utilizada pelo transporte per capita em 46 cidades do mundo



FONTE: Næss et al. (1996, p. 92).

A análise mostrou que o uso de energia per capita possui forte correlação com a área urbana per capita. Os coeficientes de correlação encontrados quando as cidades foram agrupadas de acordo com cada país são: Noruega ($r = 0,83$), Dinamarca ($r = 0,93$) e Suécia ($r = 0,76$). Na análise de regressão múltipla de todo o conjunto de variáveis observou-se que cinco variáveis respondiam por cerca de 74% das variações entre as cidades quanto ao uso de energia per capita.

Considerando a escassez de estudos sobre o tema no Brasil, foi propósito principal deste trabalho realizar, para as capitais brasileiras, uma análise semelhante àquelas acima citadas, adaptando-a às limitações de dados típicas de países em desenvolvimento, como será observado a seguir.

AS CAPITAIS BRASILEIRAS E A ENERGIA COM TRANSPORTE

A abordagem aqui adotada seguiu, em linhas gerais, o método da investigação pioneira desenvolvida por Newman & Kenworthy (1989) e do trabalho posterior de Næss et al. (1996). Para tal, foram levantados aspectos gerais relativos aos 27 municípios que constituem capitais de estados brasileiros (incluindo Brasília).

Os dados empregados

A proposta inicial era reunir os dados dos censos de 1970, 1980 e a contagem da população realizada em 1996, mas não havia dados de consumo de combustíveis disponíveis para todos estes anos. A Agência Nacional do Petróleo - ANP só podia fornecer dados relativos ao consumo de combustíveis para os anos de 1991 e 1996. Desta forma, já de início a análise ficou reduzida a estes anos.

Em seguida, face a indisponibilidade das variáveis área, posse de automóvel, nível de emprego, grau de instrução médio, etc. para o ano de 1991, a análise foi limitada ainda mais, restringindo-se ao ano de 1996. Neste ano, no entanto, o IBGE realizou apenas a contagem da população, não pesquisando todos os outros dados econômicos e sociais que seriam de grande utilidade para esta análise. Apesar dessas limitações, foram reunidos todos os dados possíveis para as 27 capitais dos estados brasileiros e respectivas manchas urbanas (IBGE, 1997).

Para atender à necessidade de relacionar o consumo de energia com variáveis relativas à forma urbana, foram utilizadas imagens do satélite Landsat (Inpe, 1998) para obter a melhor aproximação das áreas efetivamente urbanizadas. Estas puderam ser obtidas através do ajuste das imagens da superfície da Terra (visualizadas a partir da composição colorida de três bandas - imagem sintética) captadas pelo sensor TM (Thematic Mapper) do satélite à sua posição correta na Terra,



www.antp.org.br

realizada com o auxílio de um *software* de sistema de informações geográficas. Este ajuste permitiu a visualização da mancha urbana no entorno das capitais, incluindo suas conurbações (municípios agregados que em geral formam as regiões metropolitanas) a partir do conhecimento da localização das coordenadas centrais de todos os municípios brasileiros. Dessa forma, foi possível verificar quais cidades fazem parte das conurbações das capitais brasileiras e obter as novas dimensões das áreas que de fato formam a mancha urbana de cada capital. Observou-se também que muitas vezes as cidades que compunham as referidas manchas urbanas não correspondiam às das regiões metropolitanas definidas pelo IBGE.

Após a definição das áreas urbanizadas, foram agrupados os dados de população relativos às cidades que pertenciam às mesmas manchas urbanas. Com as novas medidas, buscou-se identificar padrões de áreas urbanas mais próximos da realidade, ou seja, o consumo de energia passa a ser comparado com áreas (urbanizadas) a que a população tem acesso através dos modos motorizados (que consomem combustíveis) e não com áreas que, apesar de fazerem parte dos municípios, não são habitadas ou sequer foram desmatadas.

Chamou-se de população "conurbada" à soma da população das capitais e das cidades que compõem as mesmas manchas urbanas. Algumas capitais não possuíam áreas conurbadas, assim não houve mudanças nos valores adotados para a população considerada nas análises conduzidas a seguir, em relação a população da capital em si.

Foi através do consumo de combustível automotivo que se pôde medir a energia que é gasta para movimentar os transportes de cada cidade, de acordo com dados da Petrobrás (1998). Os combustíveis utilizados nesta pesquisa foram: a gasolina automotiva, o óleo diesel e o álcool combustível. Nas capitais que possuem sistema de trolebus (São Paulo e Recife) e metrô (São Paulo, Rio de Janeiro e Porto Alegre) foi ainda considerado o consumo de energia elétrica para movimentá-los.

Não é fácil obter dados operacionais relativos aos transportes quando se trata de regiões conurbadas. Por outro lado, é possível obter informações quanto a aspectos de forma das conurbações a partir das imagens de satélite. Alguns destes aspectos, como por exemplo as relações X/Y, mostram como se dá o espalhamento urbano das capitais conurbadas. A medida X representa a maior dimensão na direção leste-oeste e a Y na direção norte-sul. Esta relação permite observar que cerca de 75% das cidades estudadas se desenvolvem mais na direção norte-sul do que na direção leste-oeste ($x/y < 1$, conforme mostrado na tabela 1).

Tabela 1
Classificação das cidades em relação aos eixos L-O e N-S

Faixas da relação X/Y	Nº	%	Cidades na faixa
0,00 - 0,40	1	3,71	Macapá
0,41 - 0,60	2	7,40	Recife e Palmas
0,61 - 0,80	6	22,22	Aracaju, Porto Alegre, João Pessoa, Florianópolis, Manaus e Campo Grande
0,81 - 1,00	11	40,74	Maceió, Belém, Goiânia, Teresina, Vitória, Natal, Belo Horizonte, Brasília, Curitiba, Salvador e Rio de Janeiro
1,01 - 1,20	1	3,71	Fortaleza
1,21 - 1,40	3	11,11	Boa Vista, Rio Branco e São Paulo
1,41 - 1,60	3	11,11	São Luís, Cuiabá e Porto Velho
Total	27	100	

A medida da área circundante mostra a área do círculo que envolve a mancha urbana observada pelas imagens do satélite. O raio envolvente é a medida do raio desta área circundante. A relação área real/área circundante mostra o quão compacta é a mancha urbana. Quanto mais próximo da unidade está o seu valor, mais compacta será a cidade e, conseqüentemente, menor a proporção de vazios urbanos.

As análises conduzidas com os dados mencionados acima, cujos resultados principais aparecem resumidos no próximo item, referem-se às capitais brasileiras com suas respectivas conurbações. Outras relações, baseadas em grupos diferentes de dados foram também investigadas e podem ser encontradas em Pampolha (1999):

- 27 capitais sem considerar suas áreas conurbadas;
- 3.694 municípios brasileiros.

O consumo de energia per capita nas capitais e suas regiões conurbadas

As cinco capitais (algumas delas incluindo cidades conurbadas) que apresentaram o menor gasto de energia com transporte, em ordem crescente de consumo, foram: João Pessoa, Teresina, Salvador, Fortaleza e Belém. Em 1996, as populações destas cinco conurbações variaram de 549.363 habitantes (João Pessoa) até 2.238.363 habitantes (Salvador). Na média, seus habitantes consumiram cerca de 10.280 megajoules per capita, neste mesmo ano.

Em um outro extremo, estão as cinco capitais que mais consumiram energia com transportes no ano de 1996. São elas, em ordem decres-

cente: Boa Vista, Cuiabá, Rio Branco, Porto Velho e Campo Grande. Os habitantes destas cinco cidades consumiram, em média, 37.020 megajoules per capita, durante aquele ano. Este valor é cerca de 260% superior à média de consumo das cidades mais econômicas. Suas populações variaram entre 150.442 habitantes (Boa Vista) e 628.144 habitantes (Cuiabá).

Quanto aos aspectos de forma, as cinco capitais de menor consumo de energia per capita (João Pessoa, Teresina, Salvador, Fortaleza e Belém) mostraram valores de X/Y entre 0,704 e 1,089. Já as capitais com maior consumo como Boa Vista, Cuiabá, Rio Branco, Porto Velho e Campo Grande tiveram valores entre 0,800 e 1,580.

O raio envolvente nas cinco capitais mais econômicas variou na faixa 10-18 km, sendo que João Pessoa (menor consumo de energia) teve raio de 14 km. Nas cinco cidades com maior consumo, os raios variaram entre 7 e 13 km. A relação área real/área circundante das cinco mais econômicas com relação ao consumo de energia com transportes variou entre 0,18 e 0,40. Para as cinco maiores consumidoras, esta relação variou entre 0,22 e 0,47.

A tabela 2 mostra o resumo dos resultados encontrados a partir de análises de regressões lineares bivariadas, ou seja, aquelas em que a variável dependente foi explicada considerando-se apenas uma única variável independente. A análise indica que o consumo de energia com transportes per capita, nas capitais brasileiras, possui os maiores valores de correlação com a densidade urbana ($r = -0,514$) e a relação X/Y ($r = 0,519$).

Tabela 2
Correlação entre as classes estudadas e o consumo anual de energia com o transporte urbano para capitais

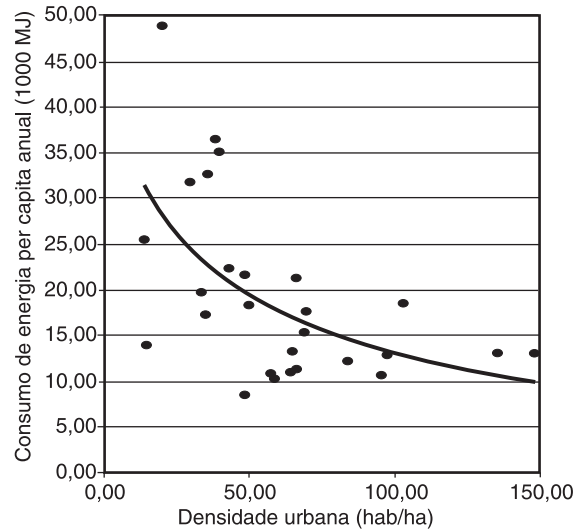
Variáveis relacionadas	(N)	Coef. de correl. de pearson (r)
Energia x densidade urbana	27	-0,514
Energia x população	27	-0,148
Energia x área circundante	27	-0,116
Energia x raio envolvente	27	-0,152
Energia x relação X/Y	27	0,519
Energia x relação área real/área circundante	27	0,185

Na figura 3 está representada graficamente a relação entre o consumo de energia per capita anual e a densidade urbana, na qual se pode observar uma linha de tendência logarítmica, tal como foi observada no estudo desenvolvido por Newman & Kenworthy (1989) e já ilustrada na figura 1 (embora naquele caso o consumo de energia fosse representado apenas pelo consumo de gasolina).



www.antp.org.br

Figura 3
Consumo anual de energia com o transporte urbano x densidade urbana nas capitais do Brasil



Uma análise de regressão múltipla também mostrou que o consumo de energia com transportes nas 27 capitais brasileiras pode ser explicado por variáveis urbanas. Após uma série de transformações matemáticas das variáveis independentes, chegou-se à equação (1), com a qual se obteve um valor de R^2 igual a 0,58. A partir de uma análise da equação constatou-se que as únicas variáveis estatisticamente significativas eram o logaritmo neperiano da densidade urbana e a relação X/Y.

$$E = 42,16 - 8,77 \ln(Dens_urb) + 6,52 (Aurb/Acirc)^{0,3} - 2,64 \ln(Raio) + 15,21 (X/Y) \quad (1)$$

onde:

E = consumo anual per capita de energia com transportes;

Dens_urb = densidade urbana das capitais e suas conurbações;

Aurb/Acirc = relação entre a área urbanizada e a área circundante;

Raio = raio da área circundante;

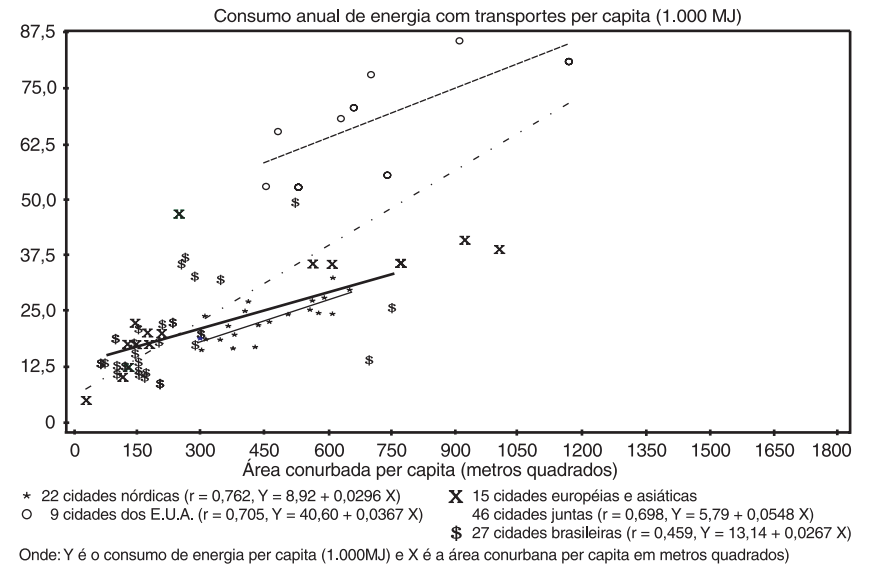
X/Y = relação entre as maiores dimensões das áreas urbanizadas, nas direções Leste-Oeste (X) e Norte-Sul (Y).

Finalmente, as relações entre o consumo de energia com transporte urbano e a área urbana per capita das capitais brasileiras e suas conurbações são mostradas na figura 4, visando a sua inserção em um contexto global. Cabe observar que a linha de tendência é muito próxima daquela encontrada para as 22 cidades nórdicas por Næss (1995).



www.antp.org.br

Figura 4
Consumo anual de energia com transporte urbano per capita versus área urbana per capita



* 22 cidades nórdicas ($r = 0,762, Y = 8,92 + 0,0296 X$)
 o 9 cidades dos E.U.A. ($r = 0,705, Y = 40,60 + 0,0367 X$)
 x 15 cidades européias e asiáticas
 \$ 46 cidades juntas ($r = 0,698, Y = 5,79 + 0,0548 X$)
 # 27 cidades brasileiras ($r = 0,459, Y = 13,14 + 0,0267 X$)

Onde: Y é o consumo de energia per capita (1.000MJ) e X é a área conurbada per capita em metros quadrados)

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Muito tem sido dito, tanto com bases teóricas quanto empíricas, que as cidades espalhadas não seriam as mais eficientes quanto ao consumo de energia com transportes. Este trabalho procurou mostrar a condição das capitais brasileiras quanto a esta questão. As variáveis envolvidas no estudo relacionaram o consumo de energia com alguns aspectos de distribuição espacial da população. Em linhas gerais, os resultados encontrados estão de acordo com as considerações teóricas abordadas na literatura internacional e apontam o impacto negativo do espalhamento no consumo de energia com transporte urbano.

Para as áreas conurbadas em torno das capitais brasileiras, o consumo de energia com transportes apresentou uma correlação positiva com o espalhamento urbano e negativa com a densidade populacional. Mais ainda, a análise de regressão múltipla aqui conduzida também mostrou que a quantidade de energia consumida com transportes nas 27 capitais brasileiras pode ser explicada por variáveis relacionadas à forma urbana.

A disponibilidade de dados relativos às capitais brasileiras é reduzida, o que limitou o levantamento de outros aspectos (tanto socioeconômico

micos, como relativos a transportes) que também poderiam ser investigados quanto à sua importância em relação ao consumo de energia. Pode-se resumidamente citar a necessidade de levantamentos de dados quanto a: padrões de emprego, oferta de estacionamento (principalmente nas áreas de forte concentração de atividades atratoras de viagens), extensão da rede viária, total de quilômetros viajados por veículo, velocidade média do tráfego, renda média per capita, preço da gasolina etc. Novos estudos são necessários, preferencialmente em ano que possua dados detalhados de censo demográfico, para ampliar o levantamento das variáveis envolvidas com o consumo de energia decorrente do transporte urbano no Brasil.

A possibilidade, explorada neste trabalho somente para as capitais, de análise de características de forma das cidades a partir de imagens de satélite oferece um grande potencial para novas pesquisas envolvendo um número maior de municípios de diferentes portes, o que enriqueceria bastante as análises até aqui conduzidas.

Apesar de todas as limitações de dados enfrentadas para a realização deste estudo, os resultados aqui encontrados reforçam a importância dos órgãos envolvidos com o planejamento físico das cidades no tocante à conservação de energia. Só a adoção de políticas urbanas voltadas ao incentivo do transporte público e dos modos alternativos ao automóvel, junto a um constante trabalho de reorganização do espaço urbano, podem modificar o gasto de energia atual, trazendo benefícios econômicos, sociais e ambientais. Ao que tudo indica, possíveis modificações nos padrões de adensamento das capitais brasileiras apresentam-se como uma medida de longo prazo para economizar energia, cujo uso efetivo precisa ser considerado, tal como proposto em Silva (1993) e Silva et al. (2000).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- FOUCHIER, Vincent. Urban density and mobility: What do we know? what can we do? The case of Paris' region. Artigo apresentado no *Second Symposium on Urban Planning and Environment*, Gröningen. Holanda, mar. 1997. 15 p.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. *Contagem da população 1996 - Resultados relativos a sexo da população e situação da unidade domiciliar*. Vol. 1. Ministério do Planejamento e Orçamento. Rio de Janeiro, 1997. 724 p.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE. *Projeto Educaserie II - Capitais brasileiras*. São José dos Campos, 1997. Em CD-ROM.
- KENWORTHY, Jeffrey R. & LAUBE, Felix B. Patterns of automobile dependence in cities: an international overview of key physical and economic dimensions with some implications for urban policy. *Transportation Research Part A: policy and practice*. 33 (7-8): 691-723, set-nov., 1999.
- KENWORTHY, Jeffrey R.; LAUBE, Felix B.; BARTER, P.; RAAD, Tamim; POBOON, C.; GUIA JR., B. *An international sourcebook of automobile dependence in cities*,



www.antp.org.br

1960-1990. Boulder, USA, University Press of Colorado, 2000. 737 p

- NÆSS, Peter. *Urban form and energy use for transport - A nordic experience*. Trondheim, 1995, 327 p. Tese de doutorado, Norwegian Institute of Technology.
- NÆSS, Peter; SANDBERG, Synnøve L.; RØE, Per Gunnar. Energy use for transportation in 22 nordic towns. *Scandinavian Housing & Planning Research*, 13 (2): 79-97, 1996.
- NEWMAN, Peter W. G. & HOGAN, Trevor. A review of urban density models: Towards a resolution of the conflict between populace and planner. *Human Ecology*, New York, 9 (3): 269-303, set., 1981.
- NEWMAN, Peter W. G. & KENWORTHY, Jeffrey R. *Cities and automobile dependence: an international sourcebook*. Aldershot, England, Gower, 1989.
- NEWMAN, Peter W. G. & KENWORTHY, Jeffrey R. *Sustainability and cities: overcoming automobile dependence*. Washington D.C., Island Press, 1999.
- PAMPOLHA, Vânia Maria Pessôa. *Espalhamento urbano e consumo de energia para transportes: o caso das capitais brasileiras*. São Carlos, 1999, 197 p. Tese de doutorado em Transportes, Universidade de São Paulo.
- PETROBRÁS. *Caracterização do setor petróleo - consumo nacional de derivados de petróleo, álcool e gás natural*. <http://www.petrobras.gov.br>, 1998.
- SILVA, Antônio Nélson Rodrigues da. *O custo do solo urbano ocioso e uma nova sistemática de tributação da propriedade*. São Carlos, 1993, 137 p. Tese de doutorado em Transportes, Universidade de São Paulo.
- SILVA, A. N. R.; FERRAZ, A. C. P.; RAIA Jr. A. A. Minimising the negative effects of urban sprawl: towards a strategy for Brazil. p. 183-192. In: JENKS, M. & BURGESS, R. *Compact cities: sustainable urban forms for developing countries*. London, Spon Press, 2000. 366 p.