



“TEN YEARS WORKING TOGETHER FOR A SUSTAINABLE FUTURE”

## O impacto das características da cidade nas emissões de GEE

DURAN JUNIOR, L. J. <sup>a</sup>, PACCA, S. A. <sup>a,\*</sup>

*a. Universidade de São Paulo, São Paulo*

*\* spacca@usp.br*

### Resumo

*Mesmo com o auxílio da tecnologia, a demanda energética per capita mundial é crescente. Apoiada em fontes fósseis, a produção e o consumo de energia causam impactos ambientais e contribuem para o avanço das mudanças climáticas. Aproximadamente 75% da energia mundial é consumida no ambiente urbano, logo, a compreensão da dinâmica de consumo de energia no ambiente residencial urbano apresenta potencial para ações de mitigação das emissões. Utilizando uma adaptação do modelo STIRPAT, este trabalho analisa as relações das características de dez cidades brasileiras com as emissões de CO<sub>2</sub>, a partir do consumo direto de energia. Os resultados apontam que o aumento da população é a variável com maior impacto no aumento das emissões, com elasticidade unitária (coeficiente 0,996), seguido pelas emissões residenciais (0,846) e o consumo direto de energia (0,481). Com menor impacto, porém relevantes, o enriquecimento da população (0,161) e os fatores de emissão na produção de eletricidade (0,017) também contribuem positivamente para o aumento das emissões. Apenas o avanço tecnológico (-0,216) e o aumento da densidade de polos atratores (-0,018) contribuem para a diminuição das emissões de CO<sub>2</sub>. Conclui-se que políticas públicas, como a segurança energética, o uso de fontes renováveis e o incentivo para descentralização e aumento dos polos atratores nas cidades, mostram-se como alternativas para redução das emissões de CO<sub>2</sub>.*

*Palavras-chave: cidades, emissões, energia, planejamento, modelagem*

### 1. Introdução

Apesar do avanço tecnológico favorecer o desenvolvimento de técnicas e equipamentos empregados na produção de energia a partir de fontes renováveis (Goldemberg and Lucon, 2007), a matriz energética mundial ainda está apoiada no uso de combustíveis fósseis. Em 2014, 78,5% da energia consumida no mundo teve como fonte primária de energia, os combustíveis fósseis (OCDE, 2016).

Embora a demanda energética diminuiu 2,9% entre 2013 e 2014 (OCDE, 2016), Nos próximos 35 anos a população mundial aumentará cerca de 25%, atingindo 9 bilhões de habitantes (UN, 2015), culminando no aumento da demanda energética (Goldemberg and Lucon, 2007), em valor absoluto e per capita, impulsionado pelo desenvolvimento econômico e social (Chen et al., 2008; Tso, 2003; Wang, 2014). Mesmo se considerarmos que a evolução tecnológica agrega a eficiência energética (T'Serclaes et al., 2008; Zhao et al., 2012), o aumento e o enriquecimento da população levam a um aumento no consumo global de energia.

No Estado de São Paulo, seguindo os padrões mundiais, os derivados de petróleo correspondem a 32% da energia total consumida, contudo, o consumo de gás natural representa somente 8%, estando

“TEN YEARS WORKING TOGETHER FOR A SUSTAINABLE FUTURE”

São Paulo – Brazil – May 24<sup>th</sup> to 26<sup>th</sup> - 2017

abaixo da média mundial, que é de 21,4%. Dadas as características da região, a biomassa (30%), e o etanol (8%) representam 38% da energia consumida (EPE, 2014). Deve-se ressaltar que o carvão mineral não é utilizado na região, enquanto representa 28,9% da matriz mundial, proporcionando ao Estado modicidade nas emissões de CO<sub>2</sub>. Outra característica do Estado reside no sua caracterização como importador de eletricidade, a qual é primordialmente gerada em hidrelétricas, correspondendo a 18% do total de energia consumida.

Independente da composição da matriz energética, 75% do total da energia primária, após ser transformada, é consumida no ambiente urbano (Dhakal, 2009; Lazaroiu and Roscia, 2012). Atualmente, 50% da população mundial, habita em cidades, (Gaube and Remesch, 2013; Pagliara, 2010; Yin et al., 2013) ocupando pouco mais do que 2% da extensão territorial mundial. Este adensamento populacional favorece a conurbação urbana e o surgimento das megalópoles, que são responsáveis por grande parte das emissões de CO<sub>2</sub>, contribuindo significativamente para o agravamento das mudanças climáticas globais (Zhang et al., 2014). Sendo assim, análises que buscam identificar as características das cidades que impactam no consumo de energia e nas emissões de CO<sub>2</sub> são relevantes para a busca de cidades sustentáveis.

Nas residências, onde ocorre o consumo direto de energia, a maior parte dos serviços energéticos depende da eletricidade. Além disso, é comum a utilização de GLP e GN (cocção e aquecimento de água), além da energia solar (aquecimento de água). Largamente utilizados em transportes, os biocombustíveis (etanol e biodiesel) e os combustíveis fósseis (gasolina e diesel) quando utilizados para transporte de passageiros (individual ou coletivo) também fazem parte do consumo direto de energia. Em alguns casos a escolha dos vetores energéticos para atender a um determinado serviço energético pode ficar a critério dos moradores da cidade, como a escolha entre etanol ou gasolina em motores bicombustível. Além disso, a existência de políticas e diretivas locais pode incentivar o uso de tecnologias mais eficientes e menos poluentes. Um exemplo é a legislação na cidade de São Paulo que obriga o uso de aquecedores solares em algumas edificações (SÃO PAULO, 2008).

Desta forma, ações concentradas nas cidades tem grande potencial para redução na emissão mundial de CO<sub>2</sub>, contribuindo para mitigação do efeito estufa. Para que estas ações sejam efetivas, é necessário o conhecimento das relações entre as forçantes, o consumo de energia e as emissões de CO<sub>2</sub>. Frente a isto, este trabalho busca quantificar e analisar as relações entre as características das cidades e as emissões de CO<sub>2</sub>, por meio de um modelo STIRPAT adaptado.

O STIRPAT é uma evolução do modelo IPAT, cuja ideia inicial data da década de 70 (Ehrlich and Holdren, 1971) que busca avaliar o impacto específico das forças antropogênicas (população, riqueza e tecnologia) no consumo direto de energia e emissões de CO<sub>2</sub> (York et al., 2003). O modelo foi aplicado a séries históricas de vários países e demonstrou que o tamanho da população apresenta um efeito na proporção de um para um com o consumo de energia e emissões de CO<sub>2</sub>. Já com relação à riqueza (*affluence*) o efeito no consumo de energia passa de inelástico para elástico com o enriquecimento da população (York et al., 2003). O enriquecimento da população é fator determinante em países em desenvolvimento, nos quais o consumo de energia per capita ainda é baixo.

Uma variante do modelo STIRPAT foi aplicado para quantificar as elasticidades das forças antropogênicas nas emissões das cidades na província de Tianjin na China (Li et al., 2015). O modelo utilizou a intensidade energética e o nível de industrialização como variáveis representativas do nível tecnológico. Este modelo também quantificou a elasticidade do capital externo nas emissões de CO<sub>2</sub>. Os resultados demonstram que o rápido processo de urbanização é o principal responsável pelo incremento das emissões, enquanto o impacto da industrialização é mais discreto.

Buscando a compreensão das relações entre o processo de urbanização e as emissões oriundas da queima de combustíveis fósseis, o STIRPART foi aplicado ao município de "Salt Lake", considerando as emissões veiculares, residenciais, comerciais e industriais (Patarasuk et al., 2016). O estudo buscou avaliar políticas públicas para redução das emissões. Após mensurar as emissões e suas origens, os resultados do modelo sugerem que: (a) o aumento das emissões no setor residencial está relacionado ao aumento da riqueza das famílias, sendo necessário investimento em educação e programas voltados para estes consumidores; (b) quando em estradas, os veículos emitem menos poluentes, pois seus motores trabalham em melhores condições de rendimento, sendo necessários investimentos para

melhoria das condições de deslocamento; (c) O sistema de transporte público baseado em eletricidade deve ser incentivado, pois emite menos do que sistemas movidos a combustíveis fósseis.

Ainda no campo da urbanização o modelo foi utilizado para confirmar a hipótese da correlação negativa entre o consumo de energia no transporte público e o índice de urbanização. Também foram confirmadas as elasticidades positivas entre o consumo de energia, população e riqueza (Liddle, 2013). Os fatores tecnológicos também são identificados no modelo STIRPAT. Partindo de uma série histórica de dados (1952-2012) foi possível identificar, em três períodos distintos, que o desenvolvimento tecnológico favoreceu a diminuição das emissões de CO<sub>2</sub> na cidade de Xinjiang (Wang et al., 2017).

Neste trabalho é aplicado um modelo baseado no STIRPAT com o intuito de quantificar as elasticidades associadas com as características das cidades e as variáveis que representam população, riqueza e tecnologia nas emissões de CO<sub>2</sub> nas principais metrópoles do Estado de São Paulo. Comparando com trabalhos anteriores, as características das cidades capturam as relações entre o ambiente urbano e a distribuição dos moradores, comércio, serviços e indústria, objetos do planejamento urbano.

## 2. Métodos

Para o estudo das relações entre os dados estatísticos levantados foi utilizado o modelo STIRPAT (York et al., 2003), adaptado a partir do modelo IPAT (Ehrlich and Holdren, 1971) o qual preconiza que o impacto (I), é decorrente da população local (P), da riqueza (A) e da tecnologia (T), conforme equação 1. Neste modelo buscou-se adaptar a abordagem STIRPAT a fim de incluir características das cidades (população urbana, quantidade de pontos atratores).

$$I = P \times A \times T \quad (1)$$

Buscando estimar o peso relativo de cada variável sobre o impacto, o modelo STIRPAT atribuiu coeficientes às variáveis do modelo, resultando na equação 2.

$$I_i = aP_i^b \times A_i^c \times T_i^d \times e_i \quad (2)$$

Sendo: "a" constante da escala do modelo, "b", "c" e "d" expoentes da população (P), das aflúncias (A) e da tecnologia (T), os quais indicam a relação entre os fatores e o impacto. Por fim "e" é o termo de erro e "i" indica que as variáveis I, P, A, T e "e" podem ser divididas em mais do que uma variável.

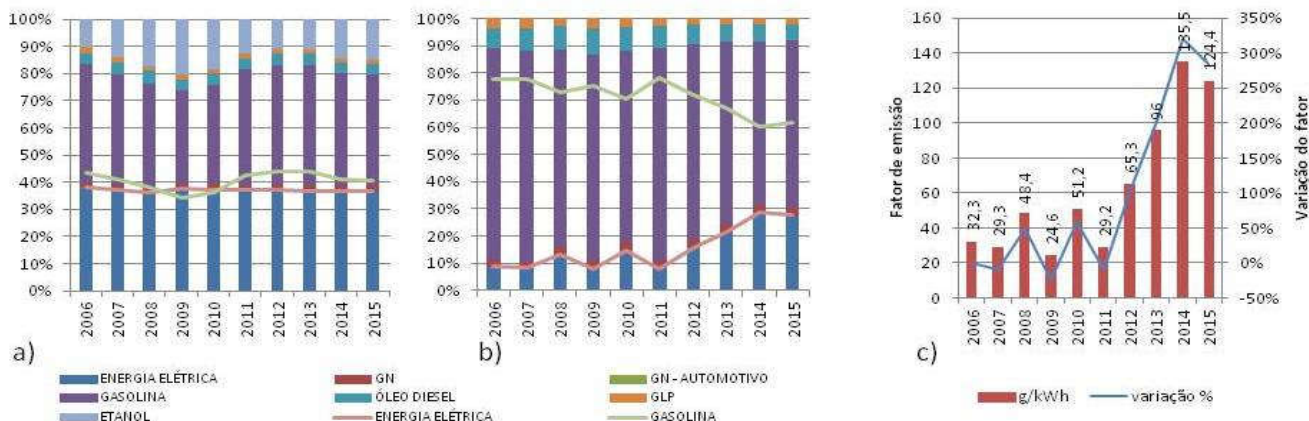
Como objeto de estudo foram selecionadas as dez cidades no Estado de São Paulo com mais do que 400 mil habitantes (IBGE, 2017a): São Paulo, Guarulhos, Campinas, São Bernardo do Campo, Santo André, Osasco, São José dos Campos, Sorocaba, Mauá e São José do Rio Preto. Foram analisados os dados referentes ao intervalo de 2006 a 2015.

As emissões de CO<sub>2</sub> de cada município foram estimadas em função do consumo energético municipal (SÃO PAULO, 2016a). Para o cálculo do CO<sub>2</sub> emitido, foram considerados fatores de emissão adotados pelo IPCC (Eggleston et al., 2006) para os combustíveis líquidos, Ministério das Ciências, Tecnologia e Inovação (BRASIL, 2017) para a eletricidade e pelo Balanço Energético Nacional (EPE, 2014) para o Gás Natural, considerando as características do gás natural distribuído na rede do Estado de São Paulo.

No caso da eletricidade, apesar do caráter regional da análise, foram utilizados fatores de emissão do sistema interligado nacional (BRASIL, 2017), pois grande parte da energia consumida no estado é gerada fora. Os valores adotados denotam a participação significativa da energia hidráulica na matriz brasileira, porém o fator de emissão médio anual foi utilizado para o respectivo ano, conforme a figura 1c. Nota-se que em dez anos o fator de emissão da eletricidade praticamente quadruplicou.

Nas cidades de Guarulhos, São Paulo, Campinas e São José dos Campos foram desprezados os consumos de combustíveis para aviação, considerando que, apesar do abastecimento das aeronaves serem realizados nos municípios, as emissões extrapolam os limites das cidades. Ainda considerou-se que os aeroportos atendem regiões mais amplas do que os municípios em que se encontram.

O foco principal do estudo está direcionado para as emissões oriundas do consumo direto de energia. O consumo direto de energia engloba a energia utilizada no interior das edificações (para qualquer finalidade) e a energia utilizada na locomoção (para o ambiente de trabalho, lazer, educação, etc.). Exclui-se, do consumo direto de energia, os deslocamentos realizados com fins comerciais. Neste contexto, foram consideradas como vetores energéticos a eletricidade, gás natural (GN), gás natural veicular (GNV), gasolina automotiva, óleo diesel, gás liquefeito de petróleo (GLP) e etanol.



**Figura 1 – a) perfil do consumo direto de energia primária. b) perfil de emissões oriundas do consumo direto de energia. c) fator de emissão na produção de eletricidade no Brasil e sua variação com base no ano de 2006.**

Como dados populacionais, foi adotado o valor absoluto da população (SÃO PAULO, 2016b). A descrição da variável populacional está descrita no grupo P da tabela 2. Os fatores econômicos utilizados no modelo foram extraídos das bases de dados do IBGE (IBGE, 2017b). Como variáveis associadas com a riqueza da população, utilizou-se o produto interno Bruto (PIB), a renda, o consumo de eletricidade, a oferta de indústrias, comércios e serviços e o volume de combustível utilizado no deslocamento (consumo direto). As descrições das variáveis econômicas (riquezas) estão descritas no grupo A da tabela 2.

A tecnologia foi agregada ao modelo relacionando o total de emissões de CO<sub>2</sub> com as residências do município e com o PIB estadual, bem como através da intensidade energética considerando o consumo direto e o consumo total de energia no estado. As descrições das variáveis tecnológicas estão descritas no grupo T da tabela 2.

**Tabela 1 - Descrição das variáveis utilizadas na adaptação do modelo STIRPAT**

GRUPO	VARIÁVEL	SÍMBOLO	DEFINIÇÃO	UNIDADE
I	Emissões CO <sub>2</sub>	I	Emissões CO <sub>2</sub> do consumo direto de energia	Toneladas
P	População	Pt	Quantidade de habitantes do município	peçoas
	PIB per capita	A\$	Produto Interno Bruto dividido pelos habitantes	R\$/hab
A	Eletricidade per capita	Ae	Consumo direto de eletricidade dividido pelos habitantes	MJ/hab
	Densidade de polos atratores	Ap	Somatória dos polos atratores dividido pela área do município	un/Km <sup>2</sup>
	Emissões diretas por residência	Tr	Emissões CO <sub>2</sub> do consumo direto dividido pela quantidade de residências no município	T CO <sub>2</sub> /residência
T	Intensidade Energética (consumo direto)	Td	Energia direta consumida dividida pelo Produto Interno Bruto	MJ / R\$
	Intensidade energética (consumo total)	Tt	Energia total consumida dividida pelo Produto Interno Bruto	MJ / R\$
	CO <sub>2</sub> /PIB	Tc	Total de emissões de CO <sub>2</sub> dividido pelo PIB	T CO <sub>2</sub> / R\$
	Fator de emissão da eletricidade	Te	Total de emissões de CO <sub>2</sub> emitido para produção de 1 MJ de energia	TCO <sub>2</sub> /MJ

Todos os dados primários foram coletados para determinar o consumo direto de energia e relacionar as

atividades antropogênicas com as emissões de CO<sub>2</sub> (Aguir Bargaoui et al., 2014; Raskin, 1995), sendo:

- I corresponde ao total de CO<sub>2</sub> emitido resultante do consumo direto uso de energia, incluindo a eletricidade, GN, GNV, gasolina automotiva, óleo diesel, GLP e etanol (Carlsson-Kanyama et al., 2008), calculada a partir do consumo direto de energia de cada município (SÃO PAULO, 2016b), aplicando-se percentuais para estimativa do consumo direto, sendo 100% da eletricidade, 100% do GN residencial, 5% do GNV, 50% da gasolina, 40% do etanol (DETRAN-SP, 2017), 6% do óleo diesel (PMSP, 2017) e 40% do GLP. Para o consumo energético considerado, as emissões foram calculadas com base nos fatores de emissão de cada tipo de combustível considerando o consumo residencial estacionário ou para mobilidade urbana (Eggleston et al., 2006). Para as emissões relativas ao uso do etanol foi considerada emissão zero de CO<sub>2</sub> (Demirbas, 2009);
- P corresponde ao total de população, contabilizando todos os residentes no município conforme estimativa do Balanço Energético do Estado de São Paulo (SÃO PAULO, 2016b);
- PIB per capita corresponde ao PIB do município dividido pela população local. Considerando que o PIB do ano de 2015 ainda não foi oficialmente divulgado, o mesmo foi estimado com base no desenvolvimento do PIB nacional (redução de 3,77% relativa ao ano de 2014);
- Eletricidade per capita corresponde ao consumo residencial, dividida pela população local;
- Polos atratores/km<sup>2</sup>: São considerados polos atratores todos os espaços que atraem as pessoas e geram deslocamento urbano (Khakpour and Rød, 2016) e conseqüente consumo de combustível. A quantidade de polos atratores foi calculada somando-se os consumidores comerciais, de serviços e industriais, disponibilizados no BEESP (SÃO PAULO, 2016b). Os deslocamentos (particular ou público) com a finalidade de transitar para o posto de trabalho, locais de lazer, consumo e serviços enquadram-se no consumo direto de energia e fazem parte do escopo deste trabalho. A variável relaciona a oferta dos polos atratores com a extensão territorial do município, entendendo que o aumento na densidade de polos atratores reduz as distâncias percorridas e o consumo de energia.
- Emissões diretas por residências: Relaciona o valor da variável "I" com o total de residências no município, conforme quantidade de instalações de medidores de eletricidade instaladas para fins residenciais (SÃO PAULO, 2016b). Esta variável buscar integrar ao modelo o avanço tecnológico aplicado no interior das residências, considerando a diminuição do consumo energético em função do aumento da eficiência dos equipamentos (exemplo: iluminação a led) e a redução das emissões relativas as substituições nos processos (exemplo: troca de fogão GLP por forno de microondas);
- Intensidade energética (consumo direto de energia): Relaciona as emissões relativas ao consumo direto com o PIB do município. Considera-se que a intensidade energética reflete o desenvolvimento tecnológico, uma vez que o aumento do PIB representa o aumento das atividades econômicas e conseqüente aumento da demanda energética. A diminuição da intensidade energética pode refletir a eficiência energética influenciada pelo avanço tecnológico.
- Fator de emissão da eletricidade: Valor médio de CO<sub>2</sub> emitido na produção da eletricidade, considerando as diversas fontes de produção distribuídas no país e as variações anuais.

Com o objetivo de quantificar e analisar as relações lineares das variáveis do modelo, a partir da adaptação do STIRPAT, o impacto é quantificado a partir da equação 3.

$$\log I = a + b \ln Pt + c \ln A\$ + d \ln Ae + e \ln Ap + f \ln Tr + g \ln Td + h \ln Tt + i \ln Tc + j \ln Te + \omega \quad (3)$$

Onde a é a intercessão, b, c, d, e, f, g, h, i, j são os coeficientes das variáveis (tabela 1) e  $\omega$  é o erro.

Os parâmetros foram analisados em de duas formas distintas, sendo que no primeiro modelo foi considerado o período de 10 anos e os dados das 10 cidades e no segundo modelo foi considerado o mesmo intervalo de tempo, porém a regressão foi realizada separadamente para cada cidade.

A evolução acumulada dos principais dados primários utilizados no modelo está apresentada na figura 2. Verifica-se a queda na população entre os anos de 2009 e 2010 em todas as cidades, exceto São Paulo. O PIB elevou-se no decorrer do tempo, exceto para o ano de 2015, onde o PIB nacional sofreu queda. Considerando que os dados do PIB de cada município ainda não foram divulgados oficialmente, a tendência de queda foi adotada para todos os municípios estudados. O consumo direto de eletricidade é crescente a cada ano, com queda em 2004 e o consumo total de energia cresce até o ano de 2003 e entra em queda até 2005. As emissões totais passam por forte declínio no ano de 2009.

A média das emissões de todas as cidades no ano de 2009 aproxima-se da média das emissões do ano de 2006. Dentre os dados primários, cabe ressaltar o comportamento da cidade de Mauá. Devido à substituição do gás natural por um grande consumidor, o consumo total de energia teve uma forte queda a partir de 2006. Quanto às emissões do município, elas ficaram abaixo do valor de 2006 até o ano de 2010, contudo sofreram aumentos anuais, nos padrões das demais cidades estudadas.

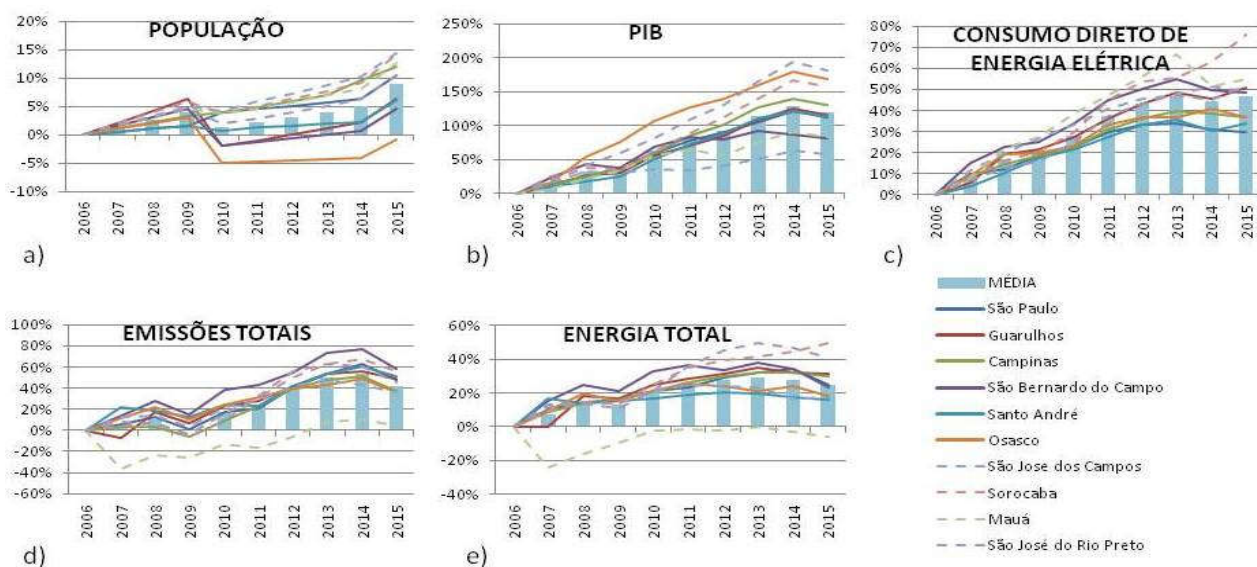


Figura 2 – Evoluções dos dados primários para as 10 cidades no período de 10 anos

### 3. Resultados

Além da análise do comportamento dos dados primários e das variáveis isoladas, as relações entre as variáveis também foram estudadas, tomando como base os dados dos 10 municípios alvos do estudo (modelo 1) e isoladamente para cada município (modelo 2), considerando o período de 10 anos (entre 2006 e 2015), através da regressão de mínimos quadrados ordinários. Os resultados do modelo 1 apresentam maior robustez sobre o modelo 2 devido à quantidade de amostras analisadas (10 vezes maior), contudo os resultados do modelo 2 possibilitam inferir os resultados das flutuações das variáveis, através da análise dos parâmetros do modelo 1, visto que para cada cidade analisada as características específicas são diferentes.

#### 3.1 Análise do modelo 1 – conjunto de 10 municípios

A tabela 3 apresenta os resultados dos modelos. No modelo 1 (primeira coluna de resultados) observa-se a população é o coeficiente que apresenta o maior influência nas emissões (0,996), com elasticidade unitária positiva, corroborando a essência do IPAT (Ehrlich and Holdren, 1971).

Apenas dois coeficientes apresentam relação negativa com as emissões, sendo que a mais significativa é a intensidade energética (-0,216), corroborando o princípio de que o avanço tecnológico é favorável à diminuição do consumo energético e a mitigação das emissões de CO<sub>2</sub> (Goldemberg and Lucon, 2007). O segundo coeficiente com relação negativa é a densidade dos polos atratores. Apesar de apresentar coeficiente relativamente baixo (-0,0218), a condição negativa indica que o aumento da oferta de polos atratores tem a capacidade de oferecer mais opções de viagem. Com a escolha de polos atratores mais próximos das residências, os percursos tendem a diminuir em distância e, conseqüentemente, em consumo energético (seja por transporte particular ou transporte público). A diminuição do consumo de energia para deslocamento reduz as emissões.

Todas as demais variáveis modeladas apontam coeficientes positivos (aumentam as emissões), porém todos os valores ficaram abaixo de 1,0 (um). As emissões de CO<sub>2</sub> oriundas do consumo direto por residência apresentam coeficiente 0,846, apontando para a importância do ambiente doméstico e dos

sistemas de transportes nas emissões de CO<sub>2</sub>.

Semelhante às emissões do consumo direto, o consumo direto de energia per capita aponta coeficiente positivo de influência nas emissões (0,481). Esta variável indica o aumento das emissões na medida em que o consumo direto individual aumenta (independente do aumento da população). Dado que o consumo de eletricidade corresponde a aproximadamente 38% do consumo direto de energia (figura 1a) e que o fator de emissão tem sido crescente nos últimos dois anos (figura 1c) elevando a participação das emissões da produção de eletricidade nas emissões totais (figura 1b), é justificável que a elevação do consumo per capita de eletricidade colabora para a elevação das emissões proveniente do consumo direto de energia.

A relação CO<sub>2</sub>/PIB apresenta coeficiente 0,2, influenciando positivamente, ainda que em menor escala as emissões de CO<sub>2</sub>. Quando considerado apenas o consumo direto de energia, a intensidade energética do conjunto de cidades apresenta coeficiente positivo de 0,186, opondo-se à intensidade energética calculada para a energia total da cidade (-0,216).

Apesar das variáveis “intensidade energética” e “intensidade de carbono” representarem o avanço tecnológico no sistema IPAT, verifica-se que, mesmo com seus valores médios em queda (figura 3), confirmando o avanço da tecnologia na produção e consumo de energia, sua influência positiva nas emissões reflete que a tecnologia aplicada não acompanha a mesma evolução do desenvolvimento econômico (medido pelo PIB), corroborando a tese de que, apesar do avanço tecnológico diminuir as emissões totais, o aumento das emissões per capita ainda é crescente, e seria maior, caso não houvesse o avanço da tecnologia. Os reais motivos deste fenômeno carecem de investigação detalhada, a qual foge do objetivo deste trabalho.

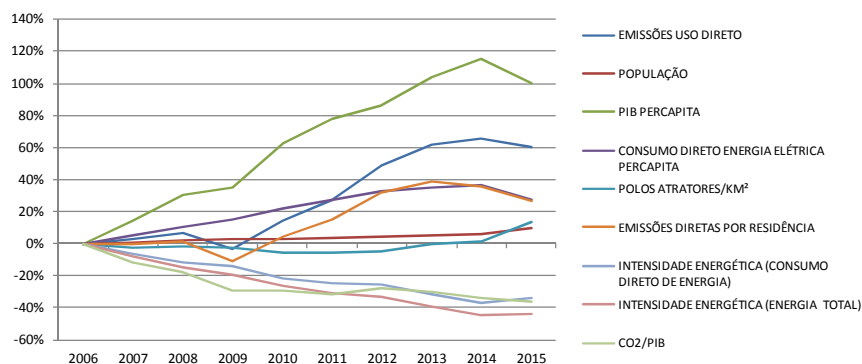


Figura 3 – Variação anual dos indicadores do IPAT com base no ano de 2006

O PIB per capita é outra variável que apresenta influência positiva nas emissões. Apesar do fator relativamente baixo (0,161) os resultados corroboram para a curva ambiental de Kuznets (Kuznets, 1955), pois o aumento do PIB per capita indica o aumento da “riqueza” da população, culminando no aumento do consumo e conseqüente aumento da degradação ambiental, especificamente, para este estudo, com o aumento das emissões de CO<sub>2</sub>.

O menor coeficiente encontrado no modelo está relacionado ao fator de emissão de CO<sub>2</sub> na produção de eletricidade (0,017). Nota-se que o percentual representado pelo consumo direto de eletricidade é estável para todos os anos analisado, mantendo-se em aproximadamente 38% do total consumido (figura 1a), contudo o total de energia consumida é decrescente nos últimos três anos analisados (2013 – 2015) (figura 2e), contribuindo, ainda, para a queda do consumo direto de eletricidade (figura 2c). A diminuição do total de energia direta consumida coincide com o aumento do fator de emissão, equilibrando o impacto analisado (emissões do uso direto de energia). Esta redução, apesar de necessitar de investigação mais aprofundada, sugere a eficiência da ação do Governo brasileiro no aumento da taxa de eletricidade em função da crise hídrica enfrentada a partir do ano de 2012.

**Tabela 2** – Coeficientes resultados da regressão realizados para o modelo 1 e 2

MUNICÍPIO	MODELO 1	MODELO 2									
	TODOS	São Paulo	Guarulhos	Campinas	SBC	Santo Andre	Osasco	SJC	Sorocaba	Mauá	SJRP
Interseção	-3,905	14,507	15,725	-3,604	9,635	-9,510	19,095	-134,22	13,101	-12,764	18,132
POPULAÇÃO	0,996	0,729	0,340	1,319	0,442	1,576	0,175	8,436	0,616	1,293	0,569
PIB PERCAPITA	0,161	1,080	0,703	0,318	0,515	-0,099	0,460	-2,203	0,341	-1,116	1,212
CONSUMO DIRETO ELETRICIDADE PERCAPITA	0,481	-0,290	-0,247	0,073	-0,181	0,380	-0,601	3,346	-0,098	1,218	-0,476
POLOS ATRADORES/KM <sup>2</sup>	-0,018	-0,192	0,053	-0,015	-0,018	-0,014	-0,021	0,122	-1,650	0,246	-0,023
EMISSIONES DIRETAS POR RESIDÊNCIA	0,846	-0,234	0,394	0,680	0,646	0,871	0,819	2,282	0,366	1,716	-0,076
INTENSIDADE ENERGÉTICA (CONSUMO DIRETO DE ENERGIA)	0,186	1,377	1,191	0,637	0,701	-0,099	0,129	-5,278	0,609	-1,415	1,884
INTENSIDADE ENERGÉTICA (ENERGIA TOTAL)	-0,216	-2,147	-1,733	-0,861	-1,057	-0,264	-1,048	6,484	-1,104	0,869	-2,830
CO <sub>2</sub> /PIB	0,200	1,780	1,240	0,511	0,675	0,123	1,024	-2,718	0,512	-0,599	1,968
FATOR DE EMISSÃO ELETRICIDADE	0,017	-0,035	-0,050	-0,012	-0,041	0,005	-0,070	0,255	0,014	-0,028	0,005

### 3.2 Análise do modelo 2 – municípios isolados

Os resultados do modelo 2 estão apresentados na tabela 4, separados para cada cidade. A análise deste modelo procura explicar as variações abruptas nos coeficientes, em função das alterações nas variáveis, corroborando as análises realizadas para o modelo 1, visto que grande parte dos valores encontrados no modelo 2 aproximam-se dos valores encontrados no modelo 1.

Para todas as cidades a população apresenta relação positiva com as emissões. O menor coeficiente está atribuído à cidade de Osasco (0,175), queda em sua população em 2010 (figura 2<sup>a</sup>). A cidade de São José dos Campos apresenta maior coeficiente (8,436) e maior desenvolvimento populacional entre as cidades e foi a única a qual, em todo o período analisado, não sofreu diminuição na população. Desta forma fica corroborada a literatura analisada que afirma que o aumento da população amplia as emissões per capita (Aguir Bargaoui et al., 2014; Ehrlich and Holdren, 1971; Liddle, 2013).

A flutuação no indicador PIB per capita está relacionada ao movimento econômico e populacional das cidades. A cidade de São José dos Campos apresenta o menor coeficiente (-2,203), contrariando a curva de Kuznets, contudo verifica-se que a cidade teve o menor aumento do PIB (figura 2b), ficando, pelo menos 50% abaixo da média, porém a população subiu acima da média (figura 2a), resultando em baixo aumento do PIB per capita. Já a cidade de São José do Rio Preto apresenta o maior coeficiente (1,212), devido ao maior aumento do PIB entre todas as cidades.

Na cidade de Mauá destaca-se a relevância do consumo direto de energia (índice 1,218) devido à queda significativa do consumo total de energia (figura 2e) influenciado pela interrupção do uso de gás natural por um único (e grande) consumidor localizado no polo petroquímico instalado na cidade. A influência dos polos atratores, apesar de relativamente baixa para todas as cidades, mantém a tendência de influência negativa nas emissões em 70% dos casos analisados.

As emissões de CO<sub>2</sub> oriundas do uso direto de energia mantém a tendência de influência positiva com coeficientes abaixo de um (1), conforme o conjunto de todas as cidades, sendo mais elevado apenas na cidade de São José dos Campos. A intensidade energética, ligada ao consumo direto de energia é muito variável para cada cidade, contudo mantém a tendência da influência positiva em 7 cidades, enquanto a intensidade energética calculada a partir da energia total, mantém a influência negativa. Para todas as cidades, exceto para a cidade de Santo André, as intensidades apresentam influências opostas (positiva e negativa), seguindo a tendência da análise do modelo 1. A intensidade de carbono é negativa apenas para as cidades de Mauá, em função da alteração da sua matriz energética (figura 2d e 2e) e São José dos Campos devido seu baixo desenvolvimento do PIB (figura 2b).



O fator de emissão da produção da eletricidade flutua positivamente ou negativamente à coeficientes muito baixos, visto que a variação no consumo de eletricidade tende a diminuir à medida em que os fatores de emissão aumentam. Cabendo ressaltar que esta relação ocorre pelo mesmo motivo, a saber: diminuição dos recursos hídricos e conseqüente alteração da fonte de produção, agregado à política de elevação das taxas de energia adotada pelo Governo brasileiro.

#### 4. Discussão e conclusão

Os resultados demonstram que, assim como em outros estudos, a variável população é a que mais se destaca. Nesse sentido o estado deve buscar desacelerar o crescimento das cidades e buscar uma maior distribuição da população no território.

O segundo coeficiente mais importante está associado com as emissões diretas por residência, o qual é superior ao coeficiente do consumo direto de energia, fato que indica a diminuição do uso de energia “limpa” no ambiente doméstico, independente da escolha do consumidor final, pois a substituição da fonte geradora é uma decisão governamental. Em comparação com o coeficiente da intensidade energética, estes dois coeficientes demonstram que a escolha de vetores energéticos menos poluentes pelos consumidores pode acarretar uma redução nas emissões. Isto demonstra a relevância de políticas que incentivem a busca por alternativas baseadas em energias renováveis. O aumento dos polos atratores apresenta um impacto moderado nas emissões, indicando que incentivar o aumento destes polos para buscar uma redução na emissão não é uma ação muito efetiva. Ou seja, o impacto do planejamento urbano é moderado quando comparado com alternativas de substituição de combustíveis, tecnologias de uso final e geração descentralizada de energia.

As variáveis impactantes analisadas (P, A e T) são sensíveis as características inerentes de cada cidade, apresentando influências diversificadas para conjunto de dados. Verifica-se também, que os desvios dos valores médios, impactam (positivamente ou negativamente) nas emissões dos Gases de Efeito Estufa. A partir da verificação da sensibilidade das variáveis é possível o emprego de políticas públicas procurando a diminuição das emissões e mitigação do efeito estufa.

Cabe destacar que a mitigação das emissões passa necessariamente pela intervenção governamental e pela escolha individual das famílias que habitam a cidade. Ações conjuntas tornam-se mais eficientes na redução das emissões, como a oferta e uso de transporte público, incentivos para geração descentralizada de energia a partir de fontes renováveis (eólica, solar) e uso de biocombustíveis.

#### 5. Referências

- Aguir Bargaoui, S., Liouane, N., Nouri, F.Z., 2014. Environmental Impact Determinants: An Empirical Analysis based on the STIRPAT Model. *Procedia - Soc. Behav. Sci.* 109, 449–458. doi:10.1016/j.sbspro.2013.12.489
- BRASIL, 2017. PORTAL DO MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO [WWW Document]. Arq. Fatores Emissão. URL <http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/321144.html> (accessed 2.28.17).
- Carlsson-Kanyama, A., Engström, R., Kok, R., 2008. Indirect and Direct Energy Requirements of City Households in Sweden: Options for Reduction, Lessons from Modeling. *J. Ind. Ecol.* 9, 221–235. doi:10.1162/1088198054084590
- Chen, S., Li, N., Guan, J., Xie, Y., Sun, F., Ni, J., 2008. A statistical method to investigate national energy consumption in the residential building sector of China. *Energy Build.* 40, 654–665. doi:10.1016/j.enbuild.2007.04.022
- Demirbas, A., 2009. Political, economic and environmental impacts of biofuels: A review. *Appl. Energy* 86, S108–S117. doi:10.1016/j.apenergy.2009.04.036
- DETRAN-SP, D.E. de T. do E. de S.P., 2017. Estatísticas de Trânsito [WWW Document]. Estat. Trânsito. URL <https://www.detran.sp.gov.br/wps/wcm/connect/portaldetran/detran/detran/EstatisticasTransito/> (accessed 2.28.17).
- Dhokal, S., 2009. Urban energy use and carbon emissions from cities in China and policy implications. *Energy Policy* 37, 4208–4219. doi:10.1016/j.enpol.2009.05.020
- Eggleston, H.S., Intergovernmental Panel on Climate Change, National Greenhouse Gas Inventories Programme, Chikyū Kankyō Senryaku Kenkyū Kikan, 2006. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories.
- Ehrlich, P.R., Holdren, J.P., 1971. Impact of Population Growth. *Science* 171, 1212–1217. doi:10.1126/science.171.3977.1212

- EPE, 2014. Balanço Energético Nacional 2014: Ano base 2013 - Relatório Final. Ministério de Minas e Energia, Rio de Janeiro.
- Gaube, V., Remesch, A., 2013. Impact of urban planning on household's residential decisions: An agent-based simulation model for Vienna. *Environ. Model. Softw.* 45, 92–103. doi:10.1016/j.envsoft.2012.11.012
- Goldemberg, J., Lucon, O., 2007. Energia e meio ambiente no Brasil. *Estud. Av.* 21, 7–20. doi:10.1590/S0103-40142007000100003
- IBGE, 2017a. IBGE | Cidades | São Paulo [WWW Document]. IBGE Cid. URL <http://cidades.ibge.gov.br/xtras/uf.php?coduf=35> (accessed 1.8.17).
- IBGE, 2017b. IBGE:: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística [WWW Document]. Prod. Interno Bruto Municípios. URL [http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/pesquisas/pesquisa\\_resultados.php?id\\_pesquisa=46](http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/pesquisas/pesquisa_resultados.php?id_pesquisa=46) (accessed 1.12.17).
- Khakpour, M., Rød, J.K., 2016. An attraction-based cellular automaton model for generating spatiotemporal population maps in urban areas. *Environ. Plan. B Plan. Des.* 43, 297–319. doi:10.1177/0265813515604262
- Kuznets, S., 1955. Economic Growth and Income Inequality. *Am. Econ. Rev.* 45, 1–28.
- Lazaroiu, G.C., Roscia, M., 2012. Definition methodology for the smart cities model. *Energy* 47, 326–332. doi:10.1016/j.energy.2012.09.028
- Li, B., Liu, X., Li, Z., 2015. Using the STIRPAT model to explore the factors driving regional CO2 emissions: a case of Tianjin, China. *Nat. Hazards* 76, 1667–1685. doi:10.1007/s11069-014-1574-9
- Liddle, B., 2013. Urban density and climate change: a STIRPAT analysis using city-level data. *J. Transp. Geogr.* 28, 22–29. doi:10.1016/j.jtrangeo.2012.10.010
- OCDE, O./, 2016. World Energy Statistics 2016. OECD Publishing.
- Pagliara, F. (Ed.), 2010. Residential location choice: models and applications, *Advances in Spatial Science*. Springer, Berlin.
- Patarasuk, R., Gurney, K.R., O'Keeffe, D., Song, Y., Huang, J., Rao, P., Buchert, M., Lin, J.C., Mendoza, D., Ehleringer, J.R., 2016. Urban high-resolution fossil fuel CO2 emissions quantification and exploration of emission drivers for potential policy applications. *Urban Ecosyst.* 19, 1013–1039. doi:10.1007/s11252-016-0553-1
- PMSP, P. do M. de S.P., 2017. Portal da Prefeitura da Cidade de São Paulo [WWW Document]. Secr. Munic. Mobilidade E Transp. URL [http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/transportes/aceso\\_a\\_informacao/index.php?p=150849](http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/transportes/aceso_a_informacao/index.php?p=150849) (accessed 2.28.17).
- Raskin, P.D., 1995. Methods for estimating the population contribution to environmental change. *Ecol. Econ.* 15, 225–233. doi:10.1016/0921-8009(95)00047-X
- SÃO PAULO, C. de, 2008. Decreto nº 49.148/2008 - Dispõe sobre a instalação de sistema de aquecimento de água por energia solar nas novas edificações do Município de São Paulo, Diário Oficial da Cidade de São Paulo.
- SÃO PAULO, E. de, 2016a. Anuário de Energéticos por Município no Estado de São Paulo - 2016 ano base 2015 (Anuário), Informações Energéticas. SECRETARIA DE ENERGIA E MINERAÇÃO, São Paulo, SP.
- SÃO PAULO, E. de, 2016b. BALANÇO ENERGÉTICO DO ESTADO DE SÃO PAULO (Balanço No. 2016/2015). Secretaria de Energia e Mineração, São Paulo.
- T'Serclaes, P. de, Devernois, N., International Energy Agency, Agence française de développement, Organisation for Economic Co-operation and Development (Eds.), 2008. Promoting energy efficiency investments: case studies in the residential sector. OECD/IEA and AFD, Paris.
- Tso, G., 2003. A study of domestic energy usage patterns in Hong Kong. *Energy* 28, 1671–1682. doi:10.1016/S0360-5442(03)00153-1
- UN, D. of E. and S.A., Population Division, 2015. World Urbanization Prospects: The 2014 Revision. New York, NY.
- Wang, C., Wang, F., Zhang, X., Yang, Y., Su, Y., Ye, Y., Zhang, H., 2017. Examining the driving factors of energy related carbon emissions using the extended STIRPAT model based on IPAT identity in Xinjiang. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 67, 51–61. doi:10.1016/j.rser.2016.09.006
- Wang, Q., 2014. Effects of urbanisation on energy consumption in China. *Energy Policy* 65, 332–339. doi:10.1016/j.enpol.2013.10.005
- Yin, Y., Mizokami, S., Maruyama, T., 2013. An analysis of the influence of urban form on energy consumption by individual consumption behaviors from a microeconomic viewpoint. *Energy Policy* 61, 909–919. doi:10.1016/j.enpol.2013.06.054
- York, R., Rosa, E.A., Dietz, T., 2003. STIRPAT, IPAT and ImpACT: analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts. *Ecol. Econ.* 46, 351–365. doi:10.1016/S0921-8009(03)00188-5
- Zhang, Y., Zheng, H., Fath, B.D., 2014. Analysis of the energy metabolism of urban socioeconomic sectors and the associated carbon footprints: Model development and a case study for Beijing. *Energy Policy* 73, 540–551. doi:10.1016/j.enpol.2014.04.029
- Zhao, X., Li, N., Ma, C., 2012. Residential energy consumption in urban China: A decomposition analysis. *Energy Policy* 41, 644–653. doi:10.1016/j.enpol.2011.11.027