Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe

Estimativas de poluentes atmosféricos do Sistema de Transportes em Manaus a partir da abordagem *Bottom-Up*

Jurandir Dutra¹, Hélder Relvas², João Rodrigues³, Geise Canalez⁴, Katia Cavalcante⁵; Andrea Waichman⁶, Myriam Lopes⁷

¹Dr. em Ciências Ambientais, Professor Adjunto I, Unidade Acadêmica da Faculdade de Estudos Sociais, Campus Setor Norte, Univesidade Federal do Amazonas, Av. General Rodrigo Otávio, 6200, Coroado I CEP, 69080-900, Manaus, Amazonas, (92) 98210-2062. jurandir.dutra@gmail.com (autor correspondente). ²Dr. em Engenharia do Ambiente, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro, Campus Universitário de Santiago, 3810-193, Aveiro, Portugal. + 351 918 505 835. helder.relvas@ua.pt. ³Dr. em Ciências de Florestas tropicais, Professora Adjunto III, Centro de Educação a Distância, Campus Setor Sul, Univesidade Federal do Amazonas, Av. General Rodrigo Otávio, 6200, Coroado I CEP, 69080-900, Manaus, Amazonas, (92) 98189-3226. joao.ufam@gmail.com. ⁴Dra. em Ciências Ambientais, Professora Colaboradora, Unidade Acadêmica da Faculdade de Ciências Agrárias, Campus Setor Sul, Univesidade Federal do Amazonas, Av. General Rodrigo Otávio, 6200, Coroado I CEP, 69080-900, Manaus, Amazonas, (92) 98189-3226. gcanalez@ufam.edu.br. ⁵Dra. em Ciências Ambientais, Professora Adjunta IV, Unidade Acadêmica da Faculdade da Informação e Comunicação, Campus Setor Norte, Univesidade Federal do Amazonas, Av. General Rodrigo Otávio, 6200, Coroado I CEP, 69080-900, Manaus, Amazonas, (92) 98129-5550. kcavalcante@ufam.edu.br. ⁶Dra. em Biologia de Água Doce e Pesca Interior, Professor Associada IVI, Unidade Acadêmica Instituto de Ciências Biológicas, Campus Setor Sul, Univesidade Federal do Amazonas, Av. General Rodrigo Otávio, 6200, Coroado I CEP, 69080-900, Manaus, Amazonas, (92) 99989-2091. awaichman@gmail.com. ⁷Dra. em Ciências Aplicadas ao Ambiente, Professora Auxiliar, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro, Campus Universitário de Santiago, 3810-193, Aveiro, Portugal. + 351 961 905 977. myr@ua.pt

Artigo recebido em 02/08/2019 e aceito em 01/11/2019

RESUMO

Foram estimadas as emissões antrópicas de gases de efeito estufa e poluentes atmosféricos para cidade de Manaus oriundas da mobilidade urbana, adotando as orientações do IPCC e as recomendações do governo brasileiro, no que tange ao uso de biomassa na matriz energética, assim como as experiências relatadas por outros grandes centros brasileiros que já publicaram seus inventários. A cidade apresentou crescimento demográfico vertiginoso nos últimos 50 anos graças à edição do Decreto 288/67 que instituiu o modelo econômico Zona Franca de Manaus com incentivos fiscais ao setor industrial. Neste período a população saltou de 314.197 habitantes em 1970 para 2.094.391 em 2016. Com uma frota de veículos de 710.586, a cidade apresenta uma série de problemas, seja de infraestrutura pela quase ausência de planejamento urbano, seja pela precariedade dos serviços públicos. As estimativas foram elaboradas a partir da abordagem *Bottom-Up*, cuja metodologia é a mais recomendada quando o volume de dados e informações é mais robusto. Foram consideradas a frota circulante estratificada por ciclo termodinâmico, a intensidade de uso e os fatores de emissão sugeridos pelo IPCC (2006) e orientados pelo governo brasileiro (Brasil, 2011). As emissões são representativas da frota e, muito embora, venham reduzindo nas últimas décadas, sobretudo, em face da implementação de diversas fases do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE e Programa de Controle da Poluição do Ar por Motocicletas e Veículos Similares - PROMAT, os resultados são de ordem preocupante e precisam fomentar o desenvolvimento de políticas públicas de transporte e saúde inerentes à qualidade do ar. Da mesma forma, a adoção de metodologia padrão com recomendações e definições claras para as condições de fronteira é o grande desafio necessário para evidenciar comparabilidade de emissões entre centros urbanos diferentes, em cenários históricos, de maneira a contribuir para a construção de Planos Municipais de Mobilidade Urbana.

Palavras-Chave: Mobilidade urbana; Gases de efeito estufa; Poluentes atmosféricos; Inventários; tecnologias de baixo carbono.

Analysis of the Displacement of Emissions Pollutants in the Manaus city, Brazil

ABSTRACT

The anthropogenic emissions of greenhouse gases and atmospheric pollutants to the city of Manaus from urban mobility were estimated by adopting the IPCC guidelines and recommendations of the Brazilian government regarding the use of biomass in the energy matrix, as well as the reported experiences by other major Brazilian centers that have already published their inventories. The city has experienced rapid growth in the last 50 years thanks to the publication of Decree 288/67, which established the economic model of the Free Zone of Manaus with tax incentives for the industrial

sector. In this period the population jumped from 314,197 inhabitants in 1970 to 2,094,391 in 2016. With a fleet of 710,586 vehicles, the city presents a series of problems, be it infrastructure due to the almost absence of urban planning or the precariousness of public services. The estimates were elaborated from the Bottom-Up approach, whose methodology is most recommended when the volume of data and information is more robust. Were considered the stratified circulating fleet by thermodynamic cycle, the intensity of use and emission factors as suggested by the IPCC (2006) and guided by the Brazilian government (Brazil, 2011). The emissions are representative of the fleet and, although they have been reducing in the last decades, mainly, due to the implementation of several phases of the Air Pollution Control Program for Motor Vehicles - PROCONVE and Air Pollution Control Program for Motorcycles and Similar vehicles - PROMAT, the results are of concern and must foster the development of public transport and health policies related to air quality. Likewise, the adoption of a standard methodology with recommendations and clear definitions for border conditions is the major challenge required to demonstrate the comparability of emissions between different urban centers, in historical scenarios, in order to contribute to the construction of Municipal Mobility Plans Urban.

Key words: Urban mobility; Greenhouse gases; Atmospheric pollutants; Inventories; low carbon technologies.

Introdução

O setor de transportes por ser uma das mais importantes forças que impulsionam a economia, acrescenta algo em torno de 3 a 5% do Produto Interno Bruto de um país. Quando os investimentos em modernização da malha e infraestrutura em transportes são priorizados e ultrapassam a casa dos 3% do PIB, o setor pode representar de 5 a 8% da fatia paga aos trabalhadores (WORDBANK, 2014).

Os diversos modais de transporte apresentam grandes variações no consumo e uso de energia e, por conseguinte, diferentes emissões de gases de efeito estufa e poluentes atmosféricos. Alguns modais são menos intensivos em energia, o que oscila os gastos para a realização do mesmo trabalho. Entretanto, outros fatores além da diversidade de modais influenciam no consumo e estão relacionados com a frequência das viagens, a distância viajada e a tecnologia empregada. Essa energia usada no setor de transportes está diretamente associada aos transportes de passageiros e de cargas.

Os combustíveis derivados de petróleo chegam a representar 97% do total de energia consumida no setor de transportes (MOTA *et al.*, 2013). Contudo, iniciativas que contemplam biocombustíveis ou tecnologias menos poluentes têm sido implantadas nas mais diversas cidades americanas e europeias. A partir de 1975 iniciou-se, no Brasil, a mistura de álcool etílico anidro na gasolina, a fim de reduzir o consumo de combustíveis fósseis, como saída alternativa à crise do petróleo instalada no mundo em anos anteriores.

O modal rodoviário, o mais utilizado no Brasil, é o mais intensivo em consumo de energia, tendo representado 90,1% da energia total consumida no setor de transportes no ano de 1999 no Brasil (BRASIL, 2010). Os combustíveis fósseis são os principais responsáveis imediatos

pela geração de energia no setor de transportes de passageiros no cenário atual e 26% das emissões de CO₂ advém dos ônibus urbanos. Se nada for feito nos próximos anos o transporte coletivo urbano e rodoviário representará 33% das emissões desse gás (BRASIL, 2013).

Um paradoxo se instala em economias, como a brasileira. O estímulo para o desenvolvimento de carros híbridos – movidos à gasolina e biocombustível e/ou energia elétrica - pode gerar um contrassenso. Corre-se o risco de incentivar a migração para o uso de biocombustíveis na frota privada, como vem ocorrendo através da política de mistura de etanol anidro à gasolina e no aumento das vendas de veículos *fuel flex*, sem oportunizar a mesma política para o transporte público. Ocorre que, em certo tempo, se as políticas públicas suscitarem tecnologias menos poluentes para os modais coletivos a fim de reduzir as emissões, caminhar-se-á ao retrocesso, vez que o uso do particular estará mais eficiente do ponto de vista ambiental (BRASIL, 2013).

Muitos autores consideram que para alcançar a sustentabilidade na mobilidade urbana, em face, sobretudo, do seu pressuposto social e econômico, são necessárias estratégias de gerenciamento. O gerenciamento caminha no sentido de se encontrar formas mais eficientes do uso dos recursos alocados para o transporte, mas considerando também, melhorias na infraestrutura. A sustentabilidade no transporte tem características multidimensionais. “A sustentabilidade deveria ser entendida como uma nova ciência capaz de fazer a integração entre processos industriais, sociais e ambientais em um contexto global” (MIHELNIC *et al.*, 2003).

Neste trabalho buscou-se estimar as emissões de gases de efeito estufa e poluentes atmosféricos oriundos do setor de transportes na cidade de Manaus adotando protocolos

internacionais recomendados pelo IPCC, mas adequando à realidade local, face às peculiaridades culturais, porém sempre em conformidade com as recomendações do governo brasileiro e as experiências relatadas por outros grandes centros brasileiros.

Espera-se que seus resultados, sejam suficientes para alimentar modelos de qualidade do ar com o propósito de funcionar como motor na concepção de políticas públicas de transporte e saúde pública. De certa forma, acredita-se que as limitações encontradas, em face da carência de dados ou das divergências metodológicas, sejam capazes de suscitar discussões tanto para melhorar as estimativas como para propor ações do poder

público, no sentido de proporcionar qualidade de vida a população.

Material e métodos

Área da Pesquisa

A área de estudo compreende a cidade de Manaus, capital do Estado do Amazonas, Brasil. Está localizada à margem esquerda do Rio Negro, na sua confluência com o Rio Solimões formando o Rio Amazonas (Figura 1). Tem uma população aproximada de 2.145.444 habitantes, área de 11.401,092 km² e densidade demográfica de aproximadamente 188,2 hab/km² (IBGE, 2018).

Figura 1: Divisão político-administrativa da cidade de Manaus-AM

Fonte: Agência Reguladora dos Serviços Públicos Concedidos do Estado do Amazonas - ARSAM

A cidade experimentou um desenvolvimento urbano desordenado a partir da edição do Decreto 288 de 28/02/1967 que instituiu o modelo Zona Franca de Manaus. O pacote institucionalizou a concessão de incentivos fiscais à indústria com o objetivo de povoar a região, notadamente reconhecida como um vazio demográfico. Houve, no processo histórico, a institucionalização de diversos instrumentos de planejamento e controle urbanos, mas nenhum foi

eficaz na condução desta política pública, tendo observado um crescimento demográfico nos últimos 50 anos superior a 1000%.

Em cinco décadas a frota de veículos cresceu vertiginosamente (Figura 2) graças aos incentivos ao crédito catalisado pelo governo federal e aos baixos investimentos em transportes públicos. Em 2016 atingiu a ordem de 710.586 veículos (DETRAN, 2016), o que representa 1 veículo para cada 2,95 habitantes.

Fonte: Departamento Estadual de Trânsito – Seção Amazonas - DETRAN-AM

Dados

Foram realizados inventários das emissões de poluentes atmosféricos oriundos do sistema de transportes com base na abordagem *bottom-up* recomendada pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2006). A fronteira do inventário foi definida como o volume de combustíveis comercializados dentro do perímetro urbano da cidade. Por ser mais abrangente e conservador, este método deve ser preferido ao *top-down*, uma vez que detalha as estimativas em concepção crescente (de baixo para cima) (CESTESB, 2001).

Os volumes anuais de gasolina automotiva, etanol hidratado e óleo diesel comercializados na cidade de Manaus para o período de 2010 a 2015 foram obtidos da Agência Nacional do Petróleo – ANP (ANP, 2016). Para completar a série, o volume do consumo destes combustíveis para o ano de 2016 foi estimado através de técnica estatística de regressão simples, já que o parágrafo 2º do art. 5º do Decreto Nº 7724/12 impede a divulgação da venda de combustíveis, por município, antes de decorridos 12 meses do exercício.

Com o intuito de partilhar as emissões do transporte público urbano de passageiros por

ônibus foram coletados junto a Superintendência Municipal de Transportes Coletivos – (SMTU) a composição da frota, assim como a quilometragem percorrida para o período de 2010 a 2016 e o consumo de biodiesel para o ano de 2009 (SMTU, 2016). Desta forma, a estimativa de combustível para os demais anos da série foi obtida por proporcionalidade e uso de regra de três composta.

A composição da frota total estratificada por categoria de veículos para o período de 2010 a 2016 foi obtida junto ao Departamento Estadual de Trânsito – DETRAN/AM. Contudo, esta estratificação não fazia referência à matriz energética, em suas composições dos ciclos termodinâmicos de motores, conforme configuração adotada no 1º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários (BRASIL, 2011). Apenas classificava por tipo de veículos (micro-ônibus, automóveis, caminhão, motocicleta, ônibus etc.). Assim, a fim de acompanhar as recomendações exaradas pelo documento em questão, a frota foi distribuída por ciclos (*otto* e diesel), sendo, para tal, estratificada nas mesmas proporções da composição da frota nacional (Tabela 1).

Tabela 1. Composição da frota de veículos dos ciclos *otto* e diesel da cidade de Manaus - 2010 a 2016.
 Fonte: DETRAN-AM (2016) e BRASIL (2011) com adaptações.

Ciclo	Categoria	Combustível	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Otto	Auto	Gasolina C	137.877	131.655	123.846	116.350	107.946	98.199	88.181
		Etanol	14.171	12.884	11.556	10.634	9.187	7.986	6.852
		Flex	119.980	147.996	175.396	203.873	230.803	253.367	271.731
	Leves	Gasolina C	21.123	20.079	19.215	18.322	17.349	16.435	15.474
		Etanol	1.821	1.563	1.344	1.146	965	809	670
		Flex	16.459	19.298	22.075	24.549	26.568	28.276	29.456
	Moto	Gasolina C	96.889	108.768	120.727	132.881	148.775	158.594	165.886
		Flex	3.281	5.116	7.045	9.058	11.418	13.353	15.038
	Total Otto			411.601	447.359	481.204	516.813	553.011	577.019
Diesel	Leves	Biodiesel	40.679	47.298	51.859	56.254	60.965	64.378	65.818
	Pesados	Biodiesel	33.567	34.459	36.727	38.981	38.564	38.940	39.175
	T. Público	Biodiesel	1.295	1.292	1.502	1.478	1.414	1.410	1.362
	Ônibus	Biodiesel	9.677	10.921	11.688	12.166	12.471	12.388	12.305
	Total Diesel			85.218	93.970	101.776	108.879	113.414	117.116
Total anual			496.819	541.329	582.980	625.692	666.425	694.135	711.948

Metodologia

A metodologia deste trabalho foi baseada em métodos protocolares matemáticos e estatísticos. Para elaborar o trabalho foi realizado inventário das emissões de poluentes atmosféricos do sistema de transportes a partir da abordagem *bottom-up* e adequações contidas no Primeiro Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários (MMA, 2011).

Foram inventariados os poluentes: monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x) aldeídos (RHCO), hidrocarbonetos não-metano (NMHC) e material particulado (MP), alguns reconhecidos como Gases de Efeito Local – GEL por serem precursores de ozônio troposférico (O₃).

Abordagem *bottom-up*

As dificuldades encontradas estão referendadas no 1º Inventário de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários publicado em 2011 pelo governo brasileiro. Nesta publicação oficial adotou-se o procedimento de inventário dos poluentes atmosféricos categorizado por tipo/modelo de veículos, matriz energética, fatores de emissão e tecnologia do motor, conforme requer as orientações metodológicas da abordagem.

Equação Geral

As emissões são estimadas, para cada ano, adotando-se a seguinte fórmula:

$$E = Fr \times Iu \times Fe \quad \text{onde:}$$

E = taxa anual de emissão do poluente considerado (g/ano);

Fr = Frota circulante do ano modelo considerado (número de veículos);

Iu = Intensidade de uso do modelo considerado (km/ano);

Fe = Fator de emissão do poluente considerado (g_{poluente}/km)

Frota circulante

A frota circulante proposta pelo 1º Inventário Nacional de Poluentes Atmosféricos por Veículos Automotores Rodoviários foi classificada em veículos do ciclo *otto* e do ciclo diesel, sendo estratificada por tipo de combustível adotado (BRASIL, 2011).

Os veículos do ciclo *otto* foram subclassificados em: automóveis, comerciais leves e motocicletas, movidos a gasolina automotiva e/ou etanol hidratado. Os veículos do ciclo diesel foram subclassificados em: comerciais leves, ônibus urbanos, ônibus rodoviários, caminhões leves, caminhões médios e caminhões pesados tendo como matriz energética o biodiesel.

Como, no caso de Manaus, a estratificação não considerava o combustível, utilizou-se a mesma proporção nacional para a composição da frota local, sendo que os caminhões leves, caminhões médios e caminhões pesados foram classificados todos como “Outros Pesados”, assim como os ônibus rodoviários e os ônibus urbanos foram classificados todos como “Ônibus”, uma vez que na base de dados fornecida pelo DETRAN-AM não havia esta separação (Tabela 1). Entretanto, as emissões dos ônibus do transporte coletivo público urbano foram partilhadas das demais.

Intensidade de Uso

É uma variável dependente de vários fatores socioeconômicos, mas no 1º Inventário Nacional de Poluentes Atmosféricos por Veículos Automotores Rodoviários representa a idade do veículo.

Devido à escassez de dados e à pequena representatividade nos estudos encontrados, a intensidade de uso foi estabelecida a partir do consumo de combustível rodoviário observado no país e declarado no Balanço Energético Nacional (BEN) - 2010 (BRASIL, 2010; 2011). Com base na quilometragem por litro (km/l) e na intensidade de uso de referência (km/ano) estima-se o consumo de combustível de cada categoria de veículos do ciclo *otto* e do ciclo diesel.

Fatores de emissão

O IPCC recomenda que sempre que houver fator de emissão local ou regional disponível, este deve ser preferido em detrimento a qualquer outro. No entanto, essas informações, se existem, não estão disponíveis. Dessa forma, adotaram-se os mesmos fatores de emissão, para cada gás, definido no 1º Inventário Nacional de Poluentes Atmosféricos por Veículos Automotores Rodoviários.

Estes fatores foram estabelecidos com base nos fatores médio de emissão dos poluentes regulamentados pelo PROCONVE e PROMOT, disponibilizados pela CETESB em seus relatórios de qualidade do ar e apontam para fatores mais próximos da realidade brasileira (BRASIL, 2011; VIANNA *et. al.*, 2009).

Resultados e discussão

Emissões de hidrocarbonetos não-metano (NMHC)

No cômputo geral, as emissões de hidrocarbonetos não-metano – NMHC seguem o

mesmo comportamento da série de CH₄ (Dutra, 2019). São registrados valores da ordem de 3.053,1 t/ano para o ano de 2010 e 2.494,8 t/ano para 2016. Isso representa uma eficiência de redução de emissões de 18%, o que simboliza um decrescimento médio anual de 2,61% (Figura 3). Os NMHC são importantes precursores de O₃ troposférico.

Figura 3: Emissões de NMHC da frota de veículos da cidade de Manaus, por tipo de combustível, no período de 2010 a 2016. Abordagem *bottom-up* com adequações.

Entretanto, quando avaliado o desempenho de cada combustível nas emissões de NMHC, percebe-se que a gasolina C apresenta o mais acentuado declínio em relação aos demais combustíveis – emite em 2010 1.345,5 t/ano e 928,1 t/ano em 2016 - com eficiência de redução de aproximadamente 31%. O óleo diesel decresce desde o início da série. Em 2010 emite 1.131,8 t/ano e em 2016, 953,3 t/ano (Figura 3). Como esta abordagem não considera o setor elétrico, a inserção do gás natural não tem fundamento. Esse comportamento pode ser justificado pelo acréscimo de biodiesel, em percentuais crescentes, a partir de 2007, com valores iniciais de mistura em 2% até atingir 7% nos últimos dois anos, mas também, tem forte probabilidade de ser resultado das contribuições da evolução tecnológica que tornou os motores mais eficientes em emissões de alguns gases, a fim de atender as exigências do PROCONVE.

O etanol hidratado tem comportamento antagônico à gasolina C, pois representa uma função crescente e quase linear. Em 2010 emite valores da ordem de 577,9 t/ano e 613,4 t/ano em 2016, elevando as emissões em 6% (Figura 3). Esse resultado é consequência do ingresso continuado e crescente de veículos *fuel flex* que

reduziu o consumo de gasolina C e permitiu, obedecida a sazonalidade e política geral de preços, adesão ao consumo de etanol hidratado sempre que a razão entre o último e o primeiro fosse inferior a 0,7.

Avaliando as emissões de NMHC para cada categoria de veículos, observa-se uma tendência de redução em todas elas. Essa tendência, de modo geral, é similar aos resultados apontados no 1º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários, cujo comportamento reflete a estabilização das emissões promovidas pela progressiva e restritiva adoção de limites mais rigorosos (Brasil, 2011).

Observando o Ciclo Otto, os comerciais leves são a categoria mais representativa de redução de emissões, mas em função do crescimento inferior da frota se comparada com os automóveis e motocicletas. Iniciam a série emitindo 169,7 t/ano em 2010 e findam com 117,3 t/ano em 2016. Verifica-se, então, uma eficiência de redução da ordem de 31%, caracterizando um decréscimo médio anual de 4,43% (Tabela 2).

Tabela 2: Quadro comparativo geral das estimativas de emissões de NMHC da cidade de Manaus para categorias de veículos do Ciclo Otto, no período de 2010 a 2016

Ano	Autos	Com. Leves	Motocicletas
2010	1.235,80	169,7	515,9
2011	1.187,60	156,7	495,9
2012	1.141,30	147,1	474,9
2013	1.111,10	138,7	454,3
2014	1.112,80	130,8	446,5
2015	1.044,50	124	422,1
2016	1.028,40	117,3	395,8

As reduções das emissões dos veículos do Ciclo Diesel foram mais sutis. A mais representativa foi a categoria dos ônibus – ônibus urbanos e demais, incluído os ônibus do transporte público de passageiros, mas também outras modalidades de transporte, cujas emissões não foram partilhadas pela frota. As emissões em 2010 somam 396,8 t/ano e 315,6 t/ano em 2016. No tocante ao transporte público de passageiros, as reduções foram mais expressivas ainda, da ordem de 31%, o que simboliza uma redução média anual de 4,42% (Tabela 3). Contudo, este resultado pode ser reflexo da estagnação do quantitativo da frota observado nos últimos anos e não da eficiência esperada na adoção de políticas

energéticas de baixo carbono na mobilidade urbana (Dutra, 2018).

Tabela 3: Quadro comparativo geral das estimativas de emissões de NMHC da cidade de Manaus para categorias de veículos do Ciclo Diesel, no período de 2010 a 2016.

Anos	Com. Leves	Demais Pesados	Transporte Público	Ônibus Total
2010	87,1	648	52	396,8
2011	91,9	626,5	48,4	409,9
2012	92,1	631,3	52	403,5
2013	91,9	617,7	47	388,1
2014	92	598,1	41,7	368,7
2015	90,2	575,7	38,8	340,6
2016	85,9	551,7	35	315,6

A Figura 4 mostra as emissões de NO_x desagregadas por tipo de combustível. As emissões de modo geral vêm diminuindo graças à implementação de fases mais avançadas do PROCONVE, que exigiram mais rigor e controle aos fabricantes.

Figura 4: Emissões de NO_x frota de veículos da cidade de Manaus, por tipo de combustível, no período de 2010 a 2016. Abordagem *bottom-up* com adequações.

As emissões totais iniciam com valores da ordem de 23.829,5 t/ano em 2010 e atingem em 2016, 18.346,1 t/ano. Isso representa uma eficiência de redução da ordem de 23%, comportamento esse observado na mesma ordem de grandeza para o diesel (22.742,9 t/ano em 2010 e 17.550,4 t/ano em 2016) (Figura 4).

As emissões da gasolina C apresentam a margem de redução girando em torno de 34%, pois emitem em 2010, 823,9 t/ano e em 2016 apenas 547,8 t/ano. Verifica-se que as emissões etanol hidratado foram menos representativas

entre todos os combustíveis analisados, cujos registros não ultrapassaram 6% de encolhimento (Figura 4).

Os veículos do Ciclo Otto reduziram as emissões para o período estudado, sendo os comerciais leves os mais representativos, com reduções da ordem de 53%, seguido pelos automóveis, com eficiência girando em torno de 34%. Contudo, diferentemente de todas as categorias analisadas, em qualquer dos ciclos, as motocicletas apresentaram comportamento diferente, pois elevaram as emissões em aproximadamente 50%, provavelmente porque a frota quase dobrou nos últimos sete anos (DENATRAN, 2016) (Tabela 4).

Tabela 4: Quadro comparativo geral das estimativas de emissões de NO_x da cidade de Manaus para categorias de veículos do Ciclo Otto, no período de 2010 a 2016.

Ano	Automóveis	Comerciais Leves	Motocicletas
2010	854,6	117,4	114,6
2011	800,5	104,7	124,6
2012	746,7	94,6	134,2
2013	703,4	85,4	143,6
2014	661,8	78,4	156,7
2015	617,3	72,4	163,1
2016	562	66,8	166,8

Contudo, o diesel chegou a representar 95% de todas as emissões, em todos os anos da série. A categoria dos veículos pesados, inclusive todos os tipos de caminhões, é a grande responsável, correspondendo a quase 56% do volume. Se somar as emissões desta categoria com os ônibus percebem-se representações em torno de 90%, com pequenas variações para todos os anos (Tabela 5). Essa tendência também é observada no 1º Inventário Nacional de Emissões Veiculares por Veículos Automotores Rodoviários, inclusive nas projeções futuras daquele documento que englobam previsões até 2020 (BRASIL, 2011).

Tabela 5: Quadro comparativo geral das estimativas de emissões de NO_x da cidade de Manaus para categorias de veículos do Ciclo Diesel, no período de 2010 a 2016

Veículos do Ciclo Diesel – em t/ano				
Ano	Com. Leves	Demais Pesados	Transporte Público	Ônibus Total
2010	1.714,4	13.265,6	1.016,9	7.762,9
2011	1.882,6	13.298,6	982	8.322,4
2012	1.897,7	13.371,8	1.062,7	8.238,4
2013	1.844,2	12.977,1	939,8	7.766,6
2014	1.796,2	11.756,7	816,3	7.223,9
2015	1.709,8	10.890,1	743,7	6.523,3
2016	1.580,4	10.068,9	655	5.901,1

As emissões de CO, por tipo de combustível, estão apresentadas na Figura 5. Observa-se que a gasolina C foi a grande responsável pela redução nas emissões. Em 2010, esse combustível emitiu 9.724,2 t/ano contra 6.266,5 t/ano em 2016, consolidando uma eficiência de aproximadamente 36%, o que caracteriza uma diminuição média anual de 5,08%.

Figura 5: Emissões de CO pela frota de veículos da cidade de Manaus, por tipo de combustível, no período de 2010 a 2016. Abordagem *bottom-up* com adequações.

O diesel também apresenta tendência redutora nas emissões, embora mais tímido que a gasolina C, provavelmente porque a tecnologia dos motores não tenha evoluído na mesma proporção que a dos carros movidos à gasolina C, mas também porque a mistura de etanol anidro à gasolina A (gasolina pura) em proporções acima de ¼ da composição do combustível torne-o mais limpo, do ponto de vista das emissões. Entretanto,

nota-se que a série cresce até 2013, quando inicia a queda. O etanol hidratado cresce todos os anos, embora com pouca expressividade em face do aumento da frota de *fuel flex*. Em 2010 emite valores da ordem de 2.922,6 t/ano e em 2016, 3.156,8 t/ano (Figura 5). Todo este comportamento confirma a previsão contida no 1º Inventário Nacional de Emissões Veiculares por Veículos Automotores Rodoviários (BRASIL, 2011).

Este gás é um importante precursor de O₃ troposférico, sendo amplamente utilizado para indicar o sinal das atividades humanas seja pelo resultado do processo de combustão incompleta ocorrido na queima de combustíveis fósseis ou por queimadas de biomassas de florestas tropicais (Logan, 1985; Kirchhoff, 1996).

Analisando as emissões dos veículos do Ciclo Otto percebe-se que todas as categorias reduziram suas emissões em patamares similares como consequência da entrada em vigor de fases mais exigentes do PROCONVE e PROMAT. Pode-se afirmar que a evolução tecnológica, amparada por exigências legais, contribuiu fortemente para a redução. De modo geral, a eficiência girou em torno de 1/4, sobretudo na frota de automóveis e motocicletas, cujo crescimento foi mais significativo no período (Tabela 6).

Tabela 6: Quadro comparativo geral das estimativas de emissões de CO da cidade de Manaus para categorias de veículos do Ciclo Otto, no período de 2010 a 2016.

Veículos Ciclo Otto – em t/ano			
Ano	Automóveis	Comerciais Leves	Motocicletas
2010	7.379,7	1.006,9	4.260,2
2011	6.996,2	914,6	4.018,1
2012	6.645,8	846,4	3.842,5
2013	6.410	789,3	3.634,3
2014	6.199,9	737,9	3.530,1
2015	5.957	695,6	3.296,6
2016	5.712,60	655,6	3.055,20

Entretanto, as emissões dos veículos do Ciclo Diesel cresceram ou mantiveram-se praticamente estáveis no tempo, para todas as categorias. Os comerciais leves e demais pesados – caminhões leves, médios e pesados – registraram um leve aumento, enquanto os ônibus, sobretudo, os urbanos do transporte público de passageiros, foram mais eficientes na redução. Isso pode significar melhoria na qualidade ambiental, em

face do volume de pessoas transportadas neste modal ou resultado da estagnação da frota, sem evolução do serviço ou baixa qualidade da contraprestação, cujas condições de transportes de massas podem ter sido comprometidas. Em números absolutos as emissões deste ciclo foram muito inferiores ao Ciclo Otto. Em 2010 representaram 31% e em 2016, 45% das emissões do Ciclo Otto (Tabela 7).

Tabela 7: Quadro comparativo geral das estimativas de emissões de CO da cidade de Manaus para categorias de veículos do Ciclo Diesel, no período de 2010 a 2016.

Veículos do Ciclo Diesel – em t/ano				
Ano	Com. Leves	Demais Pesados	Transp. Público	Ônibus Total
2010	300,2	2.273,9	179,7	1.371,5
2011	329,8	2.287,7	173,1	1.467,4
2012	343,5	2.393,7	192,8	1.494,9
2013	355,6	2.483,1	179,9	1.486,8
2014	368,6	2.425,7	164,8	1.458,4
2015	373,1	2.401,3	158,3	1.388,3
2016	366,1	2.365,5	146,9	1.323,1

As emissões de RCHO – aldeídos – partilhadas por combustíveis estão descritas na Figura 6.

Figura 6: Emissões de RCHO pela frota de veículos que tem álcoois na composição de suas matrizes da cidade de Manaus no período de 2010 a 2016. Abordagem *bottom-up* com adequações

Para todos os anos e todos os combustíveis a série cresce. Os aldeídos são compostos resultantes da queima de álcoois, que são constituídos por radicais de hidrocarbonetos ligados a um ou mais hidroxilas (OH), combinação de oxigênio e hidrogênio, altamente reativos e instáveis, presentes na atmosfera e

Ano	Automóveis	Comerciais Leves
2010	56,1	7,6
2011	56,3	7,3
2012	56,6	7,1
2013	57,6	7
2014	58,4	6,8
2015	58,6	6,6
2016	58,4	6,4

importante precursor de O_3 troposférico (LOGAN, 1985). Esse radical une-se a um carbono, numa ligação simples. Mas costuma ser representado por $R^?OH$, no caso aqui $RCHO$, pois faz parte de seu grupo funcional. Esses grupos funcionais possuem estrutura química semelhante e como consequência, comportamento similar.

As emissões totais têm elevação sutil. Registram em 2010, 63,6 t/ano e em 2016, 64,8 t/ano, verificando aumento de apenas 2%. Entretanto, internamente observa-se que as emissões de gasolina C vêm decrescendo, enquanto as de etanol disparam, equilibrando as emissões. A gasolina C em 2010 emite 23,3 t/ano e em 2016, 16,1 t/ano contabilizando uma redução de aproximadamente 30%. O etanol hidratado inicia a série com valores da ordem de 40,3 t/ano em 2010 e finda 2016 com 50 t/ano, elevando as emissões em 25% e compensando, em números absolutos, as emissões da gasolina C. Enquanto em 2010 o etanol hidratado representava 2/3 das emissões da gasolina C, em 2016 já respondia por aproximadamente 78% (Figura 6). Esse comportamento pode ser justificado pela elevação da frota *fuel flex* em detrimento de veículos dedicados a um único combustível e a adoção do etanol com matriz substituta.

Ao avaliar as emissões por categoria de veículos (Tabela 8) nota-se que os automóveis, são de longe, os grandes vilões das emissões de $RCHO$. Os automóveis emitem em 2010 56,1 t/ano e em 2016 58,4 t/ano, elevando a participação em 5% enquanto os comerciais leves são responsáveis por apenas 7,6 t/ano em 2010 e 6,4 em 2016, registrando retração de 15%. Não foram computadas as emissões das motocicletas porque não possuem, ainda, tecnologia *fuel flex* que permitiram realizar comparativos entre combustíveis com a presença de álcoois na sua composição.

Tabela 8: Quadro comparativo geral das estimativas de emissões de $RCHO$ da cidade de Manaus para categorias de veículos do Ciclo Otto,

exceto motocicletas, no período de 2010 a 2016, em t/ano.

As estimativas de material particulado – MP, categorizada por veículos do Ciclo Otto movidos a gasolina C e Ciclo Diesel, estão descritas na Figura 7. Não foram inventariadas as emissões de MP oriundas do etanol hidratado. Para efeitos de contabilização foram consideradas apenas partículas com diâmetro equivalente igual ou inferior a $2,5 \mu m$ ($MP_{2.5}$), pois representam grande parte das emissões veiculares (Brasil, 2011). Esses poluentes, embora não sejam regulamentados pelo PROCONVE ou PROMOT são determinantes da qualidade de vida da população, chegando a desencadear uma variedade de doenças dos sistemas respiratório e cardiovascular, o que pode onerar o sistema de saúde e reduzir a qualidade de vida da população (Miranda, *et al*, 2014).

Figura 7: Emissões de MP pela frota de veículos do Ciclo Otto movidos a gasolina C e Ciclo Diesel da cidade de Manaus no período de 2010 a 2016. Abordagem *bottom-up* com adequações

Os veículos do Ciclo Diesel são, de longe, os grandes responsáveis pelas volumosas emissões de MP. Embora seu comportamento seja de redução – em 2010 foram emitidos 734,6 t/ano e 430,8 t/ano em 2016 – seus valores absolutos são altos e expressivos quando comparados à gasolina C (Figura 7). Essa eficiência de redução deve ser resultado indireto da implantação da Fase P7 do PROCONVE, com estabelecimento de limites mais rígidos.

Quando avaliadas internamente as emissões por categoria de veículos, percebe-se que os veículos de cargas ou de passageiros são os que causam maior impacto. Os caminhões pesados, médios e leves, embora registrem redução de 42% entre 2016 e 2010 e os ônibus de 41% para o mesmo período, ainda emitem em termos analíticos, somas consideradas expressivas. Entretanto, na partilha que compete

ao transporte público de passageiros por ônibus, o registro de redução foi superior a todas as categorias do Ciclo Diesel, com eficiência de redução de 52% contra 41% do total de ônibus (Tabela 10).

Um comportamento quase estável é observado nos veículos do Ciclo Otto movidos à gasolina C, cuja eficiência de redução girou em torno de 7% entre 2016 e 2010, em todas as categorias (Tabela 9).

Tabela 9: Quadro comparativo das estimativas de emissões de MP, para veículos movidos a gasolina C do Ciclo Otto da cidade de Manaus, no período de 2010 a 2016.

Veículos Ciclo Otto – em t/ano			
Ano	Automóveis	Comerciais Leves	Motocicletas
2010	3,4	0,5	7,5
2011	3,4	0,5	7,4
2012	3,4	0,5	7,3
2013	3,4	0,5	7,2
2014	3,3	0,5	7,3
2015	3,3	0,5	7,2
2016	3,2	0,5	7,0

Tabela 10: Quadro comparativo das estimativas de emissões de MP, para veículos do Ciclo Diesel da cidade de Manaus, no período de 2010 a 2016.

Veículos do Ciclo Diesel – em t/ano				
Ano	Com. Leves	Demais Pesados	Ônibus Trans. Púb.	Total Ônibus
2010	55,6	417,7	34,2	261,3
2011	57,8	398,8	31,3	265,6
2012	55,5	384,2	32,4	251,4
2013	51,5	357,8	27,4	226,8
2014	47,9	310,5	22,8	201,6
2015	43,3	275,1	19,8	173,7
2016	38,1	243,0	16,6	149,7

De modo geral, a tendência de redução deverá continuar sendo registrada nos próximos anos, conforme previsto no 1º Inventário Nacional de Emissões Veiculares por Veículos Automotores Rodoviários, cuja previsão já pode ser confirmada parcialmente, vez que o referido documento estimou emissões até 2009 e projetou valores entre 2010 e 2020, onde o comportamento sugerido pode ser comprovado neste inventário local.

De maneira similar, o MP emitido por veículos automotores da mobilidade urbana estão em consonância com o comportamento das emissões de NO_x.

Conclusões

Observa-se que as emissões de poluentes atmosféricos vêm diminuindo nos últimos anos devido à implementação de fases mais avançadas do PROCONVE e PROMOT que catalisaram melhoria na evolução da tecnologia dos motores, mas também à política pública de combustíveis mais limpos adotada pelo governo federal que autoriza a mistura de biocombustível à gasolina pura e, ainda que em menores proporções, ao diesel.

De certa forma, este inventário pode funcionar como indicador de oportunidades para se mitigarem as mudanças climáticas ou efeitos locais, de modo a fundamentar o desenvolvimento de uma Política Municipal de Meio Ambiente, detentora de mecanismos e instrumentos eficientes para a sua execução, até porque as emissões do subsetor de transportes tem elevada participação nas contribuições do setor de energia em todos os outros inventários já elaborados por cidades brasileiras, fato que este que não deve ser diferente em Manaus.

Contudo, são necessárias iniciativas que possibilitem padronizar as estimativas das emissões de regiões metropolitanas, estabelecendo regras para definição de condições de fronteiras e outras especificidades capazes de permitir comparabilidade e instrumento para a tomada de decisão na construção das políticas públicas de mobilidade urbana, por exemplo.

Como sugestão para mitigar essas emissões propõe-se aumentar a eficiência do sistema de transporte público, com fundamento nas dimensões da sustentabilidade, com adoção de matrizes energéticas de baixo carbono ou mesmo renovação da frota para tecnologias de motores mais modernas e eficientes, de maneira tal a desencorajar o uso dos automóveis particulares. Entretanto, a construção de ciclofaixas em consonância com políticas de arborização, funciona também como ações de atenuação destes impactos e promotoras de qualidade de vida à população.

Implantar Sistemas de Transporte Rápido por Ônibus – TRO ou tão somente corredores segregados, assim como promover a migração da frota do transporte público para veículos movidos a matrizes energéticas de baixo carbono, além de reduzir as emissões *per capita* de poluentes atmosféricos, pode resultar também, em ação

inscrita em atividades do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, cujo registro, se acatado, poderá render recursos financeiros que fomentarão, talvez, um fundo para a melhoria do sistema. Isso sem mencionar a experiência única de uma metrópole amazônica, com capacidade para ser referência, vez que está inserida na maior floresta tropical do planeta, cujo apelo remonta à conservação ambiental.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e Tecnologia pelo suporte financeiro ao CESAM, através de fundos nacionais portugueses (UID/AMB/ 50017/2013) e do FEDER, por meio da parceria PT2020 e Compete 2020. Agradecem ainda o apoio financeiro da CAPES através da concessão de bolsa ao doutorando Jurandir Moura Dutra pelo Programa de Doutorado Sanduíche no Exterior (PDSE).

Referências

- Brasil, 2006. Primeiro Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa: emissões de gases de efeito estufa por fontes móveis, no setor energético. Relatório de Referência. Ministério da Ciência e Tecnologia - MCT.
- Brasil, 2010. Primeiro Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa: emissões de dióxido de carbono por queima de combustíveis: abordagem Top-down. Relatórios de Referência. Ministério da Ciência e Tecnologia - MCT.
- Brasil, 2010. Primeiro Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa: emissões de dióxido de carbono por queima de combustíveis: abordagem Bottom-up. Relatórios de Referência. Ministério da Ciência e Tecnologia - MCT.
- Brasil, 2010. Balanço Energético Nacional - BEN. Ministério das Minas e Energia - MME.
- Brasil, 2011. Primeiro Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários. Ministério do Meio Ambiente - MMA.
- Brasil, 2013. Plano Setorial de Transporte e Mobilidade Urbana para Mitigação da Mudança do Clima - PSTM. Ministério das Cidades e Ministério dos Transportes.
- Brasil, 2016. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/desenvolvimento-sustentavel/agroenergia/orientacoes-tecnicas>.>> acessado em 06/01/2017.
- CETESB, 2001. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Disponível em: http://www.sinaldetransito.com.br/artigos/gases_efeito_estufa.pdf. >>Acessado em 06/01/2017.
- DETRAN-AM, 2016. Departamento Estadual de Trânsito – Secção Amazonas. Dados da evolução da frota de veículos automotores de Manaus. Comunicação pessoal.
- DENATRAN, 2016. Departamento Nacional de Trânsito. Evolução da Frota de Motocicletas. Disponível em: www.denatran.gov.br. >>Acessado em 14/02/2017.
- Fearnside, P. M. (2003). A Floresta Amazônica nas Mudanças Globais. Manaus, INPA.
- Guenther, A.; Hewitt, C. N.; Erickson, D.; Fall, R.; Geron, C.; Graedel, T.; Harley, P.; Klinger, L.; Lerdau, M.; Mckay, W. A.; Pierce, T.; Scholes, B.; Steinbrecher, R.; Tallamraju, R.; Taylor, J.; Zimmerman, P. (1995). A global model of natural volatile organic compounds emissions. *Journal of Geophysical Research* 100, 8873–8892.
- Guenther, A.; Baugh, B.; Brasseur, G.; Greenberg, J.; Harley, P.; Klinger, L.; Serca, D.; Vierling, L. (1999). Isoprene emission estimates and uncertainties for the Central African Expresso study domain. *Journal of Geophysical Research*, 104, 306220–30639.
- House, J. I.; Prentice, I. C.; Ramankutty, N.; Houghton, R. A.; Heimann, M. (2003). Reconciling apparent inconsistencies in estimates of terrestrial CO₂, sources and sinks. *Tellus* 55B, 345-363.
- Houghton, J. T., et al. (1996). *Climate Change 1995*, Cambridge Univ. Press, New York.
- Houghton, R. A., Skole, D. L.; Nobre, C. A.; Hackler, J. L.; Lawrence, K. T.; Chomentowski, W. H. (2000). Annual fluxes of carbon from deforestation and regrowth in the Brazilian Amazon. *Natures* 403, 301-304.
- IBGE, 2016. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cidades. Acessado em 14/02/2017.
- IPCC, 2006. Intergovernmental Panel on Climate Change. Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Inventories – Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.
- IPCC, 2006. Intergovernmental Panel on Climate Change. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories – The reference Manual – Volume 2 – Energy – IGES – Kanagawa.
- IPCC, 2007. Intergovernmental Panel on Climate Change. Fourth ASSESSMENT Report

- Working Group III – Mitigation of Climate Change – Bancoc.
- Kirchhoff, V. W. J. H. (1988). Surface Ozone Measurements in Amazonia. *Journal Geophysical Research*. 93: 1469-1476.
- Kirchhoff, V. W. J. H.; Marinho, E. V. A. (1990). Surface Carbon Monoxide Measurements in Amazonia. *Journal Geophysical Research*. 95: 16.933-16.943.
- Kirchhoff, V. W. J. H. (1996). Increasing concentrations of CO and O₃ rising deforestation rates and increasing tropospheric carbon monoxide and ozone in Amazonia. *Environmental Science and Pollution Research*. 3: 210-212.
- Logan, Jennifer A. Tropospheric Ozone: Seasonal Behavior, Trends, and Anthropogenic Influence. (1985). *Journal Geophysical Research*. 90: 10.463- 10.482.
- Logan, J. A.; Prather, M. J.; Wofsy, S. C.; McElroy, M. B. (1981). Tropospheric Chemistry: A Global Perspective. *Journal Geophysical Research*. 86: 7.210-7.254.
- Mihelnic, J.R. et al. (2003) *Sustainability Science and Engineering: The Emergence of a New*.
- Mota, Danilo de Ávila; Tavares, Paulo Henrique Gonçalves; Pires, Heverton Fernando; Pereira, Sidinei Aparecido. (2013). Transporte Rodoviário e Poluição Ambiental. *Revista Eletrônica FACP*, ano II, nº 03, Junho de 2013.
- Seinfeld, Jonh H.; Pandis, Spyros N. (2006). *Air Pollution to Climate Change*, 2nd Edition. *Atmospheric Chemistry and Physics*. ISBN: 978-0-471-72018-8, 1232 pages.
- Vianna, J. N. S.; Duarte, L. M. G.; Wehrmann, M. E. S. F. (2009). O papel do etanol na mitigação das emissões de poluentes no meio urbano. II Jornada Luso-Brasileira de Ensino e Tecnologia em Engenharia – JBLE.
- WORDBANK, 2014. The Wordbank. Disponível em: <https://www.worldbank.org/en/results/2014/03/04/supporting-transition-towards-a-low-carbon-future>. >>Acessado em 15/09/2016.