

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
PROGRAMA DE PÓS - GRADUAÇÃO EM DEFESA E SEGURANÇA CIVIL

TIAGO DO NASCIMENTO VARGAS DA SILVA

EMISSÕES DE ÓXIDO NITROSO DE ESGOTOS DOMÉSTICOS NA REGIÃO
METROPOLITANA DE SÃO PAULO: ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTOS
COM SISTEMAS DE LODOS ATIVADOS E DESCARGAS EM CORPOS HÍDRICOS

NITERÓI
2013

TIAGO DO NASCIMENTO VARGAS DA SILVA

**EMISSÕES DE ÓXIDO NITROSO DE ESGOTOS DOMÉSTICOS NA REGIÃO
METROPOLITANA DE SÃO PAULO: ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE
ESGOTOS COM SISTEMAS DE LODOS ATIVADOS E DESCARGAS EM CORPOS
HÍDRICOS**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós Graduação, em Defesa e Segurança Civil da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para a obtenção do Grau Mestre. Área de concentração: Planejamento e Gestão de Eventos Críticos. Linha de Pesquisa: Desastres Mistos.

Orientador:

Prof. Dr. William Zamboni de Mello

Co-orientadora:

Prof^ª. Dr^ª. Débora Cynamon Kligerman

NITERÓI

2013

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pelo privilégio de realizar este mestrado.

À minha esposa pelas palavras de motivação e apoio.

Aos meus pais pelo total incentivo e apoio.

Aos meus orientadores Prof. Dr. William Zamboni de Mello e Prof^a. Dra. Débora C. Kligerman, por todas as palavras de correção e motivação. Pela arte de ensinar e orientar, muito obrigado!

RESUMO

O óxido nitroso (N_2O) é um gás que contribui diretamente para o aquecimento global e indiretamente para a destruição da camada de ozônio estratosférica. Dentre as atividades antrópicas emissoras de N_2O incluem-se as estações de tratamento de esgotos (ETEs) de lodos ativados. Neste estudo, estimaram-se as emissões de N_2O provenientes de ETEs com sistemas de lodos ativados e de corpos hídricos receptores do lançamento de esgotos domésticos tratados e não tratados da Região Metropolitana de São Paulo, e, para comparação, da atividade agrícola canavieira no estado de São Paulo (SP). Constatou-se que, anualmente, as emissões de N_2O das ETEs de lodos ativados são inferiores às das dos corpos hídricos receptores de esgotos tratados e não tratados. Juntas, estas fontes emitem menos N_2O do que a atividade canavieira no estado de SP, mesmo considerando um abatimento completo da queima de resíduos nesta atividade. Entretanto, em um inventário a nível nacional esse quadro deve se inverter pela maior contribuição da população na geração de esgotos domésticos e, proporcionalmente, uma menor contribuição relativa no que tange a área de plantio de cana-de-açúcar.

Palavras-chave: óxido nitroso; estações de tratamento de esgotos; cana-de-açúcar.

ABSTRACT

Nitrous oxide (N_2O) is a gas that contributes directly to global warming and indirectly to destruction of the ozone layer. Among the anthropogenic sources of N_2O are the activated sludge wastewater treatment plants (WWTPs). In this study, we estimate N_2O emissions from activated sludge WWTPs and water bodies receiving treated and untreated domestic wastewater within the Metropolitan Region of São Paulo and compare them with estimated emissions from sugarcane plantations in the state of São Paulo (SP). It was found that N_2O emissions directly from activated sludge WWTPs are smaller than those from water bodies receiving WWTP effluents and untreated sewage. Together, these sources release less N_2O to the atmosphere than sugarcane fields in the state of SP, even considering a complete abatement of burning wastes in this activity. However, in a national inventory, a reversed framework should emerge due to greater contribution of the population to the production of sewage and, proportionally, a lower relative contribution regarding to the area of sugar cane fields.

Keywords: nitrous oxide, wastewater treatment plants, sugar cane.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: Taxas de emissão de óxido nitroso das 7 ETEs de lodos ativados da RMSP calculadas com base em FEs balizados, da esquerda para a direita, por população atendida, carga afluente e carga de NT afluente. 16
- Figura 2: Comparação das emissões de óxido nitroso atribuídas ao lançamento de efluentes de esgotos tratados e não tratados em corpos hídricos na RMSP, utilizando os fatores de emissão de 0,3% e 3%, respectivamente a esquerda e a direita de cada categoria.18

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: População atendida e vazão de esgoto tratado em ETEs com sistemas de lodos ativados operados pela SABESP na Região Metropolitana de São Paulo, dados do ano de 2010.	13
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CETESB	Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo
ETE	Estação de tratamento de esgoto
FE	Fator de emissão
GEE	Gases do Efeito Estufa
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
N	Nitrogênio
NT	Nitrogênio Total
ppbv	partes por bilhão em volume
RMRJ	Região Metropolitana do Rio de Janeiro
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo
SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SP	São Paulo
WWTPs	Wastewater treatment plants

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	09
2 OBJETIVOS	12
3 METODOLOGIA	13
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	15
5 CONCLUSÃO	22
6 REFERÊNCIAS	23

1 INTRODUÇÃO

A intensificação do aquecimento global, suas causas e consequências têm ganhado cada vez mais importância na literatura científica nos dias atuais. Parte desse problema é atribuído ao aumento das concentrações de gases do efeito estufa (GEEs) na atmosfera, visto que estes possuem a propriedade de gerar calor a partir da absorção da radiação infravermelha emitida pela superfície da Terra. Dentre os GEEs, encontra-se o óxido nitroso (N_2O), um gás oriundo de fontes naturais e antrópicas (IPCC, 2001; US-EPA, 2010). Destes, o N_2O é o menos abundante na atmosfera, porém, possui um potencial de aquecimento global 300 vezes superior ao do dióxido de carbono (CO_2) e 20 vezes ao do metano (CH_4) (IPCC, 2001). Além disso, o N_2O exerce importante papel no controle do ozônio (O_3) estratosférico por ser a principal fonte estratosférica de óxido nítrico (NO), um dos gases responsáveis pelo consumo do O_3 estratosférico (CRUTZEN, 1981) que protege a superfície do planeta de uma maior incidência de radiação ultravioleta. Em virtude da redução das concentrações dos halocarbonetos na atmosfera (NOAA, 2012), o N_2O deve se tornar, até o final do século XXI, a principal substância de origem antrópica responsável pelo consumo do O_3 estratosférico (RAVISHANKARA, DANIEL e PORTMANN, 2009).

A produção do N_2O está predominantemente associada à transformações de compostos nitrogenados por ação de microorganismos (nitrificação e desnitrificação) em sistemas terrestres e aquáticos (WRAGE *et al.*, 2001). O N_2O é emitido de ambientes naturais e ambientes influenciados por atividades humanas (SYAKILA e KROEZE, 2011). Entre os séculos XII e meados do XIX, as concentrações de N_2O na atmosfera variaram na faixa de 278 a 288 ppbv (parte por bilhão em volume) (MACHIDA *et al.*, 1995; McELROY, 2002). Desde então, estas vêm crescendo continuamente, tendo atingido a média global de 325 ppb em 2012 (NOAA, 2012), ou seja, um crescimento em torno de 20% em relação aos níveis pré-industriais, o que é atribuído à influência humana global no ciclo biogeoquímico do nitrogênio (N). De acordo com Syakila e Kroeze (2011), em 2006 a emissão global de N_2O foi de 18,8 Tg N ano⁻¹, dos quais 56% originaram-se de fontes naturais, especialmente os oceanos e os solos com cobertura de florestas tropicais, e o restante de fontes antrópicas. Dos 8,3 Tg N ano⁻¹ provenientes das atividades antropogênicas, 64% estão relacionadas direta ou

indiretamente às atividades agrícolas. Daquele total, Syakila e Kroeze (2011) estimaram para 2006 contribuições relacionadas ao esgoto doméstico da ordem de $0,3 \text{ Tg N ano}^{-1}$.

A literatura mostra uma ampla faixa de variação de fatores de emissão (FEs) de N_2O (0,001-25%, em massa de N) determinados em estações de tratamento de esgotos (ETEs), sendo essa grande variabilidade atribuída principalmente aos diferentes métodos de amostragem e condições operacionais empregadas nas ETEs estudadas (FOLEY *et al.*, 2010; KAMPSCHREUR *et al.*, 2009; LAW *et al.*, 2012). No primeiro estudo realizado no Brasil sobre esse tópico, Brotto *et al.* (2010) verificaram que 0,14% do nitrogênio total (NT) afluente a uma ETE de lodos ativados, localizada na região metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ), foi convertido a N_2O . Em relação à população atendida pela ETE, o FE encontrado por Brotto *et al.* (2010) foi $13 \text{ g N}_2\text{O pessoa}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, valor 4 vezes superior ao reportado por Czepiel, Crill e Harriss (1995), $3,2 \text{ g N}_2\text{O pessoa}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, para uma ETE localizada no nordeste dos Estados Unidos, e adotado pelas diretrizes de 2006 do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, *Intergovernmental Panel on Climate Changes*) para Inventários Nacionais de Gases do Efeito Estufa como FE proposto para o caso de ETEs com processos de nitrificação e desnitrificação controlados (IPCC, 2006).

Czepiel, Crill e Harriss (1995) e Brotto *et al.* (2010) mostraram que do total de N_2O emitido de uma ETE de lodos ativados, *ca.* 90% provem do tanque de aeração. De Mello *et al.* (2013), estudaram as emissões de N_2O do tanque de aeração de uma ETE de lodos ativados com aeração prolongada e operada de forma intermitente, na região serrana do estado do Rio de Janeiro, e obtiveram um FE de $8,8 \text{ g N}_2\text{O pessoa}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Na RMRJ, Ribeiro *et al.* (2013) estudaram as emissões de N_2O do tanque de aeração em uma ETE de lodos ativados convencional e com aeração escalonada por zonas, e encontraram um FE inferior ($1,3 \text{ g N}_2\text{O pessoa}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) ao indicado pelo IPCC (2006).

Considerando uma carga de NT afluente à ETE de $16 \text{ g N pessoa}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ para países desenvolvidos (FOLEY *et al.*, 2010). Este estudo teve como objetivo estimar preliminarmente as emissões de N_2O de ETEs com sistemas de lodos ativados da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) e compará-las às emissões estimadas do lançamento de esgotos tratados e *in natura* em corpos hídricos. A RMSP foi escolhida por se tratar de uma das áreas de maior adensamento urbano do mundo e a maior região metropolitana do país, e pela disponibilidade de informações relativas à população atendida, vazão operacional e porcentagem de esgoto

tratado de suas ETEs de lodos ativados. Por fim, comparar as emissões de N₂O atribuídas aos esgotos domésticos àquelas relacionadas à atividade canavieira de todo o estado de São Paulo.

2 OBJETIVO GERAL

Estimar preliminarmente as emissões de N₂O de ETEs com sistemas de lodos ativados da RMSP e compará-las às emissões estimadas do lançamento de esgotos tratados e *in natura* em corpos hídricos.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Comparar as emissões de N₂O atribuídas aos esgotos domésticos àquelas relacionadas à atividade canavieira de todo o estado de São Paulo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho é resultado de pesquisa exploratória, bibliográfica e de estudos de caso que tem como objetivo estimar a emissão de N₂O de 7 ETEs de lodos ativados da RMSP. No endereço eletrônico da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP, 2013) foram obtidos dados, necessários ao desenvolvimento deste trabalho, de 5 daquelas 7 ETEs, como, população atendida e vazão de esgoto tratado (**Tabela 1**).

Tabela 1 – População atendida e vazão de esgoto tratado em ETEs com sistemas de lodos ativados operadas pela SABESP na Região Metropolitana de São Paulo, dados do ano de 2010.

ETE	Habitantes	Vazão de esgoto (L s ⁻¹)
Barueri	4,4 milhões	9,7 mil
Parque Novo Mundo	1,2 milhões	2,5 mil
Suzano	720 mil	0,8 mil
São Miguel	720 mil	0,8 mil
ABC	1,4 milhões	1,9 mil
Total	8,44 milhões	15,7 mil

Fonte: SABESP (2013).

A SABESP atende a uma população de aproximadamente 15,9 milhões de habitantes na RMSP, dos quais 10,5 milhões (66% da população) têm seus esgotos coletados e tratados por 7 ETEs de lodos ativados, das quais 5 da SABESP e 2 de outras operadoras. O restante da população, correspondente a 5,4 milhões, tem somente seu esgoto coletado. As 5 ETEs da SABESP atendem a uma população de 8,44 milhões, tratando 15,7 mil L s⁻¹ de esgotos. A partir destes dados, por diferença estima-se que a população atendida pelas outras 2 ETEs seja de 2,06 milhões. Com base na população atendida e na vazão de esgoto tratado pelas ETEs operadas pela SABESP (**Tabela 1**), estima-se que as outras 2 ETEs, proporcionalmente, tratem cerca de 3,83 mil L s⁻¹ de esgotos.

Para o cálculo das emissões de N₂O das ETEs com sistemas de lodos ativados utilizou-se FEs de N₂O balizados na população atendida, na vazão de esgoto tratado e na carga de NT afluente à ETE. Para isso utilizou-se os FEs determinados por Brotto *et al.* (2010) em uma ETE com sistema de lodos ativados no Sudeste do Brasil, cujos valores são 13 g N₂O pessoa⁻¹ ano⁻¹, $9,0 \times 10^{-5}$ g N₂O L_{esgoto}⁻¹ e 0,14% da carga de NT afluente. Este último representa a

razão entre a carga de N₂O (em massa de N) transferida da ETE para a atmosfera e a carga afluyente de NT à ETE, ou seja, traduz-se como a parcela de NT que é convertida e emitida para a atmosfera sob a forma de N₂O.

Para estimativas das emissões de N₂O dos corpos hídricos receptores dos lançamentos de esgotos *in natura* e de efluentes de ETEs, utilizaram-se os FEs de 0,3% e 3%, adotados respectivamente para bacias hidrográficas receptoras de cargas de NT inferiores e superiores a 10 kg N ha⁻¹ ano⁻¹, propostos por Seitzinger e Kroeze (1998). Nesse caso, o aporte de NT à bacia hidrográfica incorpora outras fontes potenciais de N além daquelas relacionadas ao lançamento de esgotos domésticos (tratados e não tratados), como efluentes industriais e de aterros sanitários, e lixiviação e escoamento superficial de N oriundo das deposições atmosféricas e de campos agrícolas.

Para fins de se comparar a contribuição de diferentes atividades antrópicas na emissão de N₂O, estimaram-se também as emissões de N₂O atribuídas a toda a atividade de produção da cana-de-açúcar no estado de São Paulo. Para isso, foram obtidos dados referentes à área de plantio e produção total de cana-de-açúcar relativos ao ano de 2010 (IBGE, 2010). Neste caso, os FEs utilizados foram aqueles propostos por Soares *et al.* (2009), ou seja, 1,8, 1.362,9 e 631,4 kg N₂O ha⁻¹ ano⁻¹, adotados para estimativa das emissões de N₂O atribuídas às etapas de plantio, de manejo da cultura (não incluindo a queima de resíduos) e da pré-colheita (que inclui a queima de resíduos), respectivamente. Relativo a este último procedimento, estimou-se também as emissões de N₂O decorrentes da queima dos resíduos da cana a partir da equação proposta por Lima *et al.* (1999).

$$M = P \times Re \times Rsp \times Rs \times Rq \times FE$$

Equação 1

onde M representa a massa produzida de N₂O durante a queima, P a produção anual de cana, Re a parcela da produção queimada no ano de 2010 (60%; SOARES *et al.*, 2009), Rsp a relação resíduo/produção (20%), Rs o conteúdo de matéria seca no resíduo (70%), Rq a fração oxidada do resíduo na queima (80%) e FE o fator de emissão de 0,07 g N₂O kg⁻¹ de matéria seca queimada.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Emissões de N₂O das ETEs de lodos ativados da RMSP

O estudo realizado contemplou a RMSP por ser a maior região metropolitana do país e devido a disponibilidade de dados sobre ETEs com sistemas de lodos ativados, o que não se verifica para as demais regiões do Brasil. O IPCC (2006) propõem para Inventários Nacionais de Gases do Efeito Estufa o FE 3,2 (2-8) g N₂O pessoa⁻¹ ano⁻¹ para o caso de ETEs com processos de nitrificação e desnitrificação controlados. Esse FE é oriundo do estudo realizado por Czepiel, Crill e Harriss (1995), que mediram as emissões de N₂O em uma ETE municipal na cidade de Durhan, localizada em uma região de clima temperado, no nordeste dos Estados Unidos. Acredita-se, porém, que as emissões de N₂O de uma ETE de lodos ativados em regiões de clima tropical sejam superiores àquelas observadas em regiões de clima temperado, visto que a temperatura mais elevada possa influenciar positivamente na cinética das atividades metabólicas dos microorganismos e, conseqüentemente, no mecanismo de produção do N₂O (BROTTO, 2011; VON SPERLING, 2002). Portanto, utilizando-se o FE de 13 g N₂O pessoa⁻¹ ano⁻¹ (BROTTO *et al.*, 2010), estima-se que as 7 ETEs de lodos ativados da RMSP, que atendem a uma população de 10,5 milhões de habitantes, emitam diariamente $1,4 \times 10^8$ g de N₂O ano⁻¹ ou $8,9 \times 10^7$ g N ano⁻¹ (89 t N ano⁻¹) (taxa de emissão de N₂O expressa em massa de nitrogênio).

A emissão de N₂O pode ser determinada através de FEs balizados sobre outras bases de dados, tais como vazão de esgoto bruto e carga de NT afluyente à ETE. As 5 ETEs da SABESP tratam $15,7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ de esgotos atribuídos a uma população de 8,44 milhões de habitantes. As outras 2 ETEs tratam juntas o equivalente a $3,83 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Portanto, o somatório das vazões de esgotos afluyentes às 7 ETEs é de aproximadamente $19,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Com base no FE balizado sobre a vazão de esgoto afluyente, proposto por Brotto *et al.* (2010) ($9,0 \times 10^{-5}$ g N₂O L⁻¹_{esgoto}), estima-se uma emissão de N₂O de $3,5 \times 10^7$ g N ano⁻¹ (35 t N ano⁻¹).

Para uma vazão total de esgoto bruto afluyente às 7 ETEs de $19,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e uma concentração média de NT no esgoto bruto da ordem de 47 mg N L⁻¹ (OLIVEIRA e VON SPERLING, 2005a), a carga de NT afluyente às 7 ETEs é de $2,9 \times 10^{10}$ g N ano⁻¹. Brotto *et al.* (2010) estimaram que 0,14% da carga de NT afluyente à ETE de lodos ativados são

convertidos a N_2O . Sendo assim, estima-se uma emissão de N_2O das 7 ETEs da RMSP de $4,0 \times 10^7 \text{ g N ano}^{-1}$ (40 t N ano^{-1}).

Com base nos 3 FEs propostos por Brotto *et al.* (2010), estima-se que a emissão de N_2O das 7 ETEs da RMSP encontre-se na faixa de $3,5 \times 10^7$ a $8,9 \times 10^7 \text{ g N ano}^{-1}$ ($35\text{-}89 \text{ t N ano}^{-1}$) (**Figura 1**).

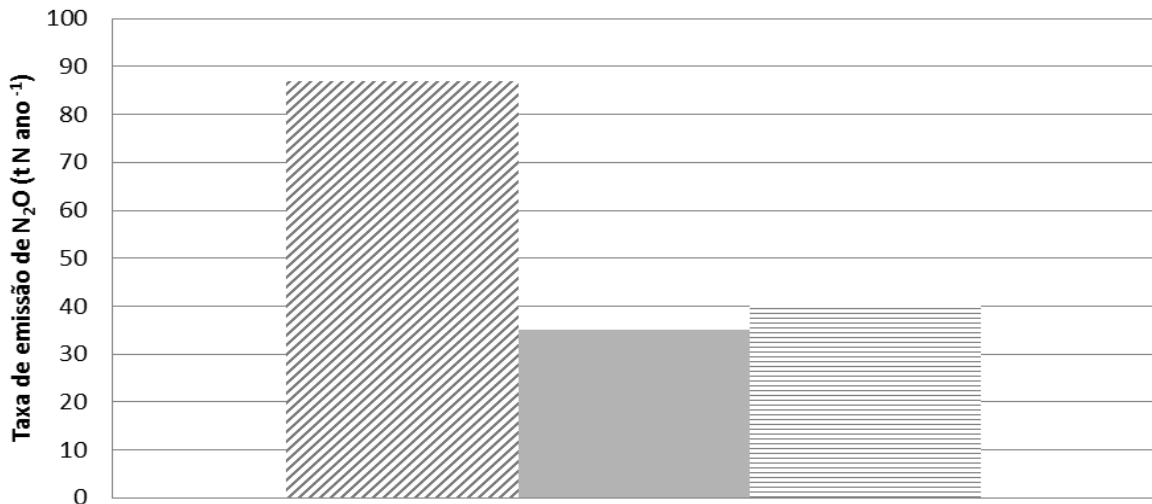


Figura 1 - Taxas de emissão de óxido nitroso das 7 ETEs de lodos ativados da RMSP calculadas com base em FEs balizados, da esquerda para a direita, por população atendida, carga de esgoto afluente e carga de NT afluente.

Assumindo-se a condição de que em uma ETE de lodos ativados a maior parte (*ca.* 90%) das emissões de N_2O provenham do tanque de aeração e utilizando os FEs propostos por Ribeiro *et al.* (2013), as taxas de emissão estimadas para as 7 ETEs seriam, balizadas por população atendida, vazão de esgoto bruto e carga de NT afluente, $8,7 \times 10^6 \text{ g N ano}^{-1}$ ($8,7 \text{ t N ano}^{-1}$), $4,7 \times 10^6 \text{ g N ano}^{-1}$ ($4,7 \text{ t N ano}^{-1}$) e $5,8 \times 10^6 \text{ g N ano}^{-1}$ ($5,8 \text{ t N ano}^{-1}$), respectivamente. Esta faixa de valores é uma ordem de grandeza inferior àquelas calculadas através dos FE propostos por Brotto *et al.* (2010). O menor valor determinado por Ribeiro *et al.* (2013) em relação àquele obtido por Brotto *et al.* (2010) é atribuído às condições de controle eficientes de alguns parâmetros operacionais, especialmente idade do lodo adequada e taxa de aeração suficiente para o sistema empregado. O controle de ambos proporciona a possibilidade de condições favoráveis aos processos microbiológicos de oxidação da matéria orgânica e aos processos de nitrificação e desnitrificação completos. Além disso, minimiza a

transferência do N₂O supersaturado no meio líquido (esgoto) para a atmosfera em virtude da utilização de aeração suficiente, evitando paralelamente maior demanda de energia por aeração excessiva (RIBEIRO *et al.*, 2013). O controle adequado de tais condições operacionais em ETEs de lodos ativados é, entretanto, pouco comum. Logo, acredita-se que o FE gerado por Brotto *et al.* (2010) se aproxime mais da realidade encontrada nas ETEs de lodos ativados do Brasil.

Emissões do N₂O de corpos hídricos na RMSP

Parte-se do pressuposto que na RMSP tanto esgotos não tratados quanto os efluentes das ETEs sejam lançados em corpos hídricos, especialmente em rios. Com base nos valores disponíveis na **Tabela 1**, calcula-se que o volume de esgoto gerado *per capita* diariamente seja de 160,7 L. Para uma concentração média de NT no esgoto bruto da ordem de 47 mg N L⁻¹ (OLIVEIRA e VON SPERLING, 2005a) e uma população equivalente a 5,4 milhões de habitantes desprovida de tratamento de esgotos, estima-se que a carga de NT atribuída ao lançamento de esgotos não tratados aos rios da região seja de *ca.* $1,5 \times 10^{10}$ g N ano⁻¹. Outras fontes potenciais que contribuem para o aporte de N aos corpos hídricos são as deposições atmosféricas, os aterros sanitários, as indústrias e, nas áreas rurais, os campos agrícolas. Entretanto, estes não foram incorporados às bases de cálculos, visto que não se inserem ao escopo deste trabalho. Dessa forma, com base nos FEs propostos por Seitzinger e Kroeze (1998), as emissões de N₂O provenientes dos corpos hídricos, atribuídas exclusivamente ao lançamento de esgotos não tratados, podem variar, em função do FE utilizado, de $4,5 \times 10^7$ a $4,5 \times 10^8$ g N ano⁻¹ (45-450 t N ano⁻¹).

Para uma concentração média de NT nos efluentes das ETEs de lodos ativados de 22 mg N L⁻¹ (OLIVEIRA e VON SPERLING, 2005a) e uma vazão de esgotos tratados das 7 ETEs estimada em 19,5 mil L s⁻¹, a carga de NT potencialmente lançada aos corpos hídricos é de $1,4 \times 10^{10}$ g N ano⁻¹. Portanto, com base nas condições estabelecidas por Seitzinger e Kroeze (1998), as emissões de N₂O atribuídas ao lançamento de esgotos tratados nos corpos hídricos da RMSP devem variar de $4,2 \times 10^7$ a $4,2 \times 10^8$ g N ano⁻¹ (42-420 t N ano⁻¹).

Em suma, a taxa de emissão de N₂O atribuída ao lançamento de esgotos domésticos tratados (efluentes de ETEs) e não tratados juntos em corpos hídricos da RMSP deve variar de

$8,7 \times 10^7$ a $8,7 \times 10^8$ g N ano⁻¹ (87-870 t N ano⁻¹). A distribuição por categoria de lançamento, discriminada com base nos 2 FEs propostos por Seitzinger e Kroeze (1998) é apresentada na **Figura 2**. Esta faixa de valores é bastante ampla. Entretanto, com base nas condições estabelecidas por Seitzinger e Kroeze (1998) para escolha do FE (0,3% ou 3%) mais adequado às condições da bacia hidrográfica em questão, acredita-se que a taxa de emissão de N₂O dos rios receptores de cargas de esgotos tratados e não tratados da RMSP seja mais próxima do limite superior desta faixa. Isso se justifica pelo fato de que o aporte de N na bacia deva superar o valor de 10 kg N ha⁻¹ ano⁻¹, condição estabelecida para uso do FE 3%. Considerando-se toda a carga de N atribuída a esgotos tratados e não tratados da RMSP ($2,9 \times 10^{10}$ g N ano⁻¹) seja lançada aos corpos hídricos que compreendem a bacia hidrográfica do Alto Tietê (área ~ 5.800 km²), inserida dentro dos limites da RMSP (área ~ 8.000 km²), o aporte de N na bacia atribuído somente a esta fonte é de 50 kg N ha⁻¹ ano⁻¹, o que justifica atribuir-se 870 t N ano⁻¹ como a taxa de emissão de N₂O dos corpos hídricos decorrente do lançamento de esgotos tratados e não tratados nesses sistemas. Entretanto, é essencial que se desenvolvam estudos *in situ* dos fatores de controle da produção e emissão de N₂O, e outros GEEs, em cursos d'água poluídos por elevadas cargas de N com vistas à geração de FEs adequados às condições geográficas regionais.

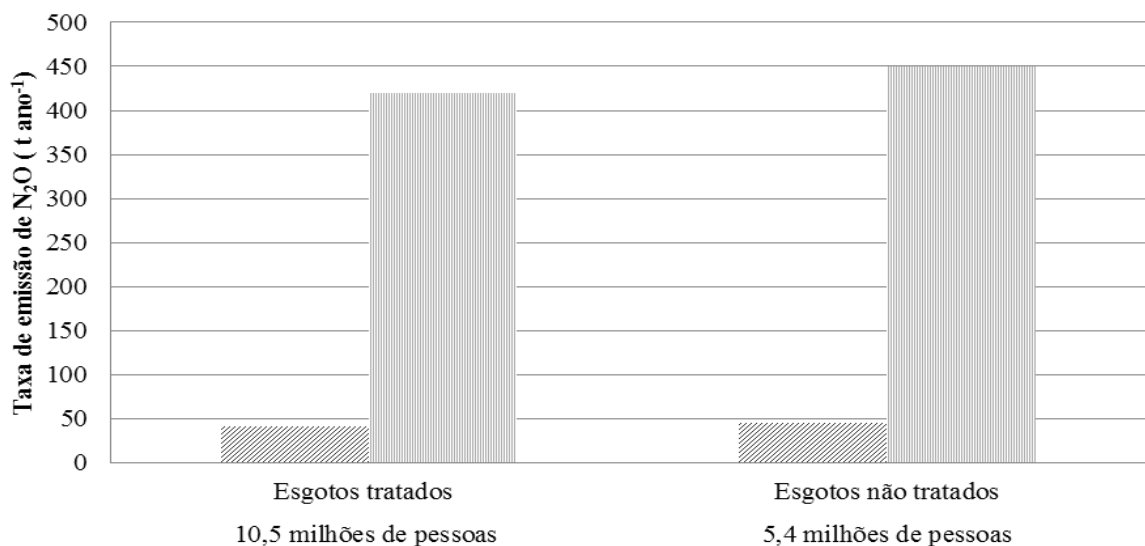


Figura 2 - Comparação das emissões de óxido nitroso atribuídas ao lançamento de efluentes de esgotos tratados e não tratados em corpos hídricos na RMSP, utilizando os fatores de emissão de 0,3% e 3%, respectivamente a esquerda e a direita de cada categoria.

Também para o caso de lançamento de esgotos tratados (efluentes de ETEs) em ambientes aquáticos, o IPCC (2006) sugere como FE 0,005 (0,0005-0,25) kg N₂O-N kg⁻¹ N_{efluente}, ressaltando, no entanto, que o mesmo é produto de um número limitado de nhbobservações de campo e de pressupostos específicos relativos às ocorrências de processos de nitrificação e desnitrificação em rios e estuários. Utilizando-se este FE, estima-se uma emissão de N₂O, atribuída ao lançamento de esgotos domésticos tratados em corpos hídricos, de $7,0 \times 10^7$ g N ano⁻¹ (70 t N ano⁻¹), valor que se situa mais próximo ao limite inferior (42 t N ano⁻¹) da faixa calculada com base nos FEs (0,3% e 3%) propostos por Seitzinger e Kroeze (1998), anteriormente apresentados. Reitera-se a necessidade de obtenção de FEs adequados às condições geográficas regionais.

Independentemente dos FEs adotados para os cálculos das taxas de emissão, estima-se que do total de N₂O emitido dos corpos hídricos, 48% provenha do lançamento de efluentes de esgotos tratados nas ETEs com sistemas de lodos ativados, e o restante (52%) dos não tratados. Embora, relativamente, essas contribuições se assemelhem, vale destacar que no primeiro (efluentes de ETEs) as taxas de emissão foram calculadas com base numa população constituída de 10,5 milhões de habitantes, cujos esgotos são tratados e, no segundo caso, de uma população de 5,4 milhões de habitantes, cujos esgotos não são tratados. Oliveira e von Sperling (2005a) relatam que sistemas de tratamento de esgotos por lodos ativados removem em média metade do N associado a carga deste elemento afluente à ETE. Portanto, a remoção parcial do N no esgoto tratado (OLIVEIRA e SPERLING, 2005a) explica a redução das emissões de N₂O na fase pós-descarga dos efluentes nos corpos hídricos (ALVIM *et al.*, 2013; RIBEIRO *et al.*, 2013).

Comparativamente, as emissões de N₂O estimadas dos corpos hídricos da RMSP (87-870 t N ano⁻¹) são superiores as emissões de N₂O diretamente das ETEs de lodos ativados da RMSP (35-89 t N ano⁻¹). Vale destacar também que o limite superior das emissões de N₂O estimadas para os corpos hídricos da RMSP, receptores hipoteticamente de esgotos domésticos somente, é equivalente as emissões deste gás de todo o rio Amazonas, estimada por Seitzinger e Kroeze (1998) em 800 t N ano⁻¹, cuja área de espelho d'água (7.600 km²) se aproxima a área da RMSP e muitas vezes superior a área (não estimada) de espelho d'água dos rios que drenam a RMSP.

Emissões de N₂O da atividade canavieira no estado de SP

O estado de SP é o maior produtor de cana-de-açúcar do Brasil. Em 2010, a área total do estado plantada com cana-de-açúcar foi de 5.071.205 ha, representando 55,3% da área plantada por cana no Brasil (IBGE, 2010). Adotando-se os FEs propostos por Soares *et al.* (2009) de 1,8 e 1.362,9 g N₂O ha⁻¹ ano⁻¹ para estimativa de emissões de N₂O atribuídas aos processos de plantio da cana e manejo da cultura, obtém-se emissões de N₂O, atribuídas a esses dois processos separadamente, de respectivamente $5,8 \times 10^6$ g N ano⁻¹ (5,8 t N ano⁻¹) e $4,4 \times 10^9$ g N ano⁻¹ (4.400 t N ano⁻¹).

Outra possível fonte de emissão de N₂O associada à atividade canavieira é a queima dos resíduos na etapa de pré-colheita. Para o período considerado, atribui-se que 60% da colheita no estado de SP se deram via queima de resíduos (SOARES *et al.*, 2009). Utilizando-se a área colhida em 2010, 4.986.634 ha (54,9% da área colhida de cana no Brasil) (IBGE, 2010), a estimativa de colheita via queima de resíduos (60%) e o FE proposto por Soares *et al.* (2009) de 631,4 g N₂O ha⁻¹ ano⁻¹ atribuído exclusivamente a essa prática, obtém-se uma emissão de $1,2 \times 10^9$ g N ano⁻¹ (1.200 t N ano⁻¹).

Comparativamente, calcularam-se também as emissões de N₂O atribuída à queima dos resíduos da cana-de-açúcar com base na equação proposta por Lima *et al.* (1999):

Em 2010, a produção de cana-de-açúcar no estado de SP foi de 426.572.099 t, o que representou 59,5% da produção nacional (IBGE, 2010). Com isso, a taxa de emissão de N₂O, para aquele ano, atribuída exclusivamente à queima dos resíduos no estado de SP é de $1,3 \times 10^9$ g N ano⁻¹ (1.300 t N ano⁻¹). Este resultado é bastante próximo àquele calculado através do FE proposto por Soares *et al.* (2009), i.e., 1.200 t N ano⁻¹. Estes valores foram, entretanto, maiores que aquele apresentado pela Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2011) no primeiro inventário de GEEs do estado de SP, i.e. $0,004 \times 10^9$ g N₂O ano⁻¹ (4 t N ano⁻¹), referente ao ano de 2008, valor atribuído referente a queima de resíduos. Para a elaboração das estimativas de GEEs, a CETESB utilizou o método do IPCC (1996, 2000).

Compararam-se também os valores estimados para o ano de 2008 referentes à produção de cana-de-açúcar e área colhida para o SP.

A taxa de emissão de N₂O encontrada para este ano atribuído somente à queima de resíduos para uma produção de 386.061.274 t (IBGE, 2008), foi de $1,16 \times 10^6$ g N ano⁻¹ (1.16 t N ano⁻¹), utilizando a equação proposta por Lima *et al.* (1999). Com base no FE proposto por Soares *et al.* (2009) de 631,4 g N₂O ha⁻¹ ano⁻¹ para uma área colhida de 4.530.784 ha (IBGE, 2008), obtém-se uma taxa de emissão de $1,092 \times 10^9$ g N ano⁻¹ (1.000 t N ano⁻¹). Os valores encontrados são também, superiores àqueles encontrados no primeiro inventário de GEEs do estado de SP elaborado pela SABESP.

Em suma, em 2010, a emissão total de N₂O atribuída exclusivamente à atividade canavieira, estimada para as fases plantio, manejo e colheita, no estado de SP, foi de $5,6 \times 10^9$ g N ano⁻¹ (5.600 t N ano⁻¹), considerando também a queima de resíduos. Nesse caso, vale ressaltar que o banimento completo da queima dos resíduos na atividade canavieira deve resultar em uma redução da ordem de 20% da emissão total de N₂O estimada para 2010, no estado de SP.

5 CONCLUSÕES

A estimativa das emissões de N_2O atribuída ao tratamento de esgotos em ETEs com sistema de lodos ativados e ao lançamento de esgotos tratados e não tratados em cursos d'água foi efetuada sobre uma base de dados de uma população residente na RMSP de quase 16 milhões de habitantes (SABESP, 2013), que para o ano de 2010 correspondeu a 38% do total da população do estado de São Paulo e 8% da população brasileira. A faixa de emissão de N_2O atribuída ao lançamento de esgotos tratados e não tratados nos corpos hídricos da RMSP é superior àquela atribuída exclusivamente às ETEs com sistemas de lodos ativados. Além disso, do total de N_2O emitido dos corpos hídricos, *ca.* 48% provêm do lançamento de esgotos tratados pelas ETEs de lodos ativados, que atende, dessa forma, a dois terços dos quase 16 milhões de habitantes computados nessas estimativas. Portanto, o tratamento de esgotos por lodos ativados minimiza a parcela de N associado aos esgotos domésticos que é transformada em N_2O . Pesquisas recentes mostram que esta parcela pode ser atenuada ainda mais. Comparativamente, as emissões de N_2O atribuídas às formas de destino dadas aos esgotos domésticos, consideradas no presente trabalho, são inferiores àquelas atribuídas à atividade canavieira em todo o estado de São Paulo, mesmo considerando o banimento da queima dos resíduos. Em nível nacional, este quadro deve se inverter, visto que a população considerada no presente estudo para o cálculo das emissões de N_2O oriundos esgotos domésticos corresponde a 8% da população brasileira e a área plantada por cana-de-açúcar no estado de São Paulo abarca mais da metade da área total plantada por cana no país. Além do fato de que a maior parte dos esgotos domésticos gerada no país não é tratada (SNSA, 2012).

REFERÊNCIAS

ALVIM, R.B.; DE MELLO, W.Z.; SILVEIRA, C.S.; RIBEIRO, R.P.; ABREU, I.M.; KLIGERMAN, D.C. Efeitos antrópicos na distribuição e carga fluvial de compostos nitrogenados na bacia hidrográfica do rio Paquequer (Teresópolis, RJ). *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 2013, submetido em dezembro de 2012.

BROTTO, A.C.; KLIGERMAN, C.D.; PICCOLI, S.A.; DE MELLO Z.W. Emissão de óxido nitroso de estação de tratamento de esgoto de lodos ativados por aeração prolongada – estudo preliminar. *Química Nova*, v. 33, n. 3, 2010, p. 618-623.

BROTTO, A.C. *Fatores de controle das emissões de óxido nitroso em tanque de aeração de estação de tratamento de esgoto*. 2011. 72 f. Dissertação (Mestrado em Geoquímica Ambiental) – Universidade Federal Fluminense, Niterói.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB). *1º Inventário de emissões antrópicas de gases de efeito estufa diretos e indiretos do Estado de São Paulo*, 2011. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/inventario-gee-sp/inventario-esp/266-1%C2%BA-inventario-de-emissoes-antronicas-de-gases-de-efeito-estufa-diretos-e-indiretos-do-estado-de-sao-paulo:-periodo-1990-a-2008>>. Acesso em: 10 mar. 2013.

COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO (SABESP). *Esgotos, como é feita a coleta e o tratamento?* 2013. Disponível em: <<http://site.sabesp.com.br/site/interna/subHome.aspx?secaoId=48>>. Acesso em: 04 de mar. 2013.

CRUTZEN P.J. Atmospheric chemical processes of the oxides of nitrogen, including nitrous oxide. In: Delwiche, C.C. (ed.), *Denitrification, nitrification and atmospheric nitrous oxide*. New York: John Wiley & Sons, 1981, p. 17-44.

CZEPIEL, P.; CRILL, P.; HARRISS, R. Nitrous oxide emissions from municipal wastewater treatment. *Environmental Science & Technology*, v. 29, n. 9, 1995, p. 2352-6.

DE MELLO, W.Z.; KLIGERMAN, D. C.; PICCOLI, A. S.; RIBEIRO, R. P.; OLIVEIRA, J. L. M.; BROTTO, A. C. Nitrous oxide emissions from an intermittent aeration activated sludge system of an urban wastewater treatment plant. *Química Nova*, v. 36, n. 1, 2013, p. 16-20.

FOLEY, J.; DE HAAS, D.; YUAN, Z.; LANT, P. Nitrous oxide generation in full-scale biological nutrient removal wastewater treatment plants. *Water Research*, v. 44, n. 3, 2010, p. 831-844.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. (IBGE). *Lavouras temporárias. Áreas plantada e colhida, quantidade produzida, rendimento médio e valor da produção, segundo os principais produtos das lavouras temporárias no Brasil*, 2010. Disponível em:

<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/pam/2010/default_zip_temp.shtm>. Acesso em: 11 de mar. 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. (IBGE). *Lavouras temporárias. Áreas plantada e colhida, quantidade produzida, rendimento médio e valor da produção, segundo os principais produtos das lavouras temporárias no Brasil*, 2008. Disponível em: <http://seriesestatisticas.ibge.gov.br/lista_tema.aspx?op=0&no=1>. Acesso em: 03 de jun. 2013.

IPCC. HOUGHTON, J.T.; MEIRA FILHO, L.G.; LIM, B.; TRÉANTON, K.; MAMATY, I.; BONDUKI, Y.; GRIGGS, D.J.; CALLANDER, B.A. (eds.) *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Reporting Instructions*. Bracknell: IPCC, 1996, OECD, IEA, 1997.

IPCC. PENMAN, J.; KRUGER, D.; GALBALLY, I.; HIRAISHI, T.; NYENZI, B.; EMMANUEL, S.; BUENDIA, L.; HOPPAUS, R.; MARTINSEN, T.; MEIJER, J.; MIWA, K.; TANABE, K. (Eds). *Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. IPCC/OECD/IEA/IGES*, Hayama, Japan, 2000.

IPCC. HOUGHTON, J.T.; DING, Y.; GRIGGS, D.J.; NOGUER, M.; VAN DER LINDEN, P.J.; XIAOSU, D. *Climate Change 2001. The Scientific Basis Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC* (Eds.) *Cambridge: University Press*, 2001, p. 881.

IPCC. EGGELSTON, H. S.; BUENDIA, L.; MIWA, K.; NGARA, T.; TANABE, K. (Eds.) *Wastewater Treatment and Discharge*. IN: IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Japan: IGES, v. 5, cap. 6, 2006, p. 6.24-6.26.

KAMPSCHREUR, M.J.; TEMMINK, H.; KLEEREBEZEM, R.; JETTEN, M.S.; VAN LOOSDRECHT, M.C. Nitrous oxide emission during wastewater treatment. *Water Research*, v. 43, n. 17, 2009, p. 4093-103.

LAW, Y.; YE, L.; PAN, Y.; YUAN, Z. Nitrous oxide emissions from wastewater treatment processes. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, v. 367, 2012, p. 1265-1277.

LIMA, M.A.; LIGO, M.A.V.; CABRAL, O.M.R.; BOEIRA, R.C.; PESSOA, M.C.P.Y.; NEVES, M.C. *Emissão de gases efeito estufa provenientes da queima de resíduos agrícolas no Brasil*. Embrapa Meio Ambiente. Jaguariúna: Livraria e editora agropecuária, 1999.

MACHIDA, T.; NAKAZAWA, T.; FUJII, Y.; AOKI, S.; WATANABE, O. Increase in the atmospheric nitrous oxide concentration during the last 250 years. *Geophysical Research Letters*, n. 22, 1995, p. 2291–2924.

MCELROY, M.B. *The Atmospheric Environment: Effects of Human Activity*. 1ª ed. Princeton. Princeton University Press, 2002, p. 326.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA). *Earth System Research Laboratory – Global Monitoring Division*. Disponível em: <<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/hats/insitu/cats/>>. Acesso em: 30 out. 2012.

OLIVEIRA, S. M. A.; VON SPERLING, M. Avaliação de 166 ETES em operação no País, compreendendo diversas tecnologias. Parte 1: Análise de desempenho. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 10, n. 4, 2005a, p. 347-357.

OLIVEIRA, S. M. A.; VON SPERLING, M. Avaliação de 166 ETES em operação no País, compreendendo diversas tecnologias. Parte 2: Influência de fatores de projeto e operação. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 10, n. 4, 2005b, p. 358-368.

RAVISHANKARA, A.R.; DANIEL, J.S.; PORTMANN, R.W. Nitrous oxide (N₂O): the dominant ozone-depleting substance emitted in the 21st Century. *Science*, 2009, p.123-125.

RIBEIRO, R.P.; DE MELLO, W.Z.; ALVIM, R.B.; ANDRADE, S.A.; BROTTTO, A.C.; KLIGERMAM, D.C.; OLIVEIRA, J.M.; DE ALMEIDA, P.A. Emissões de óxido nitroso do tanque de aeração de uma estação de tratamento de esgotos com sistema de lodos ativados convencional. *Química Nova*, 2013, submetido em outubro de 2012.

SECRETARIA NACIONAL DE SANEAMENTO AMBIENTAL SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (SNSA). *Diagnóstico dos serviços de água e esgotos – 2010*. Brasília: SNSA, 2012. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/PaginaCarrega.php?EWRERterterTERTer=95>>. Acesso em: 29 out. 2012.

SEITZINGER, S.P.; KROEZE, C. Global distribution of nitrous oxide production and N inputs in freshwater and coastal marine ecosystems. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 12, n. 1, 1998, p. 93-113.

SOARES, L.H.B.; ALVES, B.J.R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R.M. *Mitigação das emissões de gases efeito estufa pelo uso de etanol da cana-de-açúcar produzido no Brasil*. Circular Técnica 27. Seropédica: EMBRAPA, 2009, p. 14.

SYAKILA, A.; KROEZE, C. The global nitrous oxide budget revisited. *Greenhouse Gas Measurement & Management*, v. 1, 2011, p. 17-26.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). Methane and nitrous oxide emissions from natural sources. *Washington, DC: U. S. Environmental Protection Agency*, 2010.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2009. *Washington, DC: U. S. Environmental Protection Agency*, 2011.

VON SPERLING, M. *Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: lodos ativados*, 2 ed., Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais: Belo Horizonte, v. 4, 2002.

WRAGE, N.; VELTHOF, G.L.; BEUSICHEM, M.L.; OENEMA, O. Role of nitrifier denitrification in the production of nitrous oxide. *Soil Biology & Biochemistry*, v. 33, 2001, p. 1723-1732.