

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE EFLUENTES DOMÉSTICOS: ESTUDO EM UMA LOCALIDADE DA AMAZÔNIA LEGAL

Bruniele Vervloet ¹
*Tiago Balieiro Cetrulo ²

EMISSIONS OF GREENHOUSE GASES OF DOMESTIC
WASTEWATER TREATMENT PLANTS: STUDY ON A CITY
OF LEGAL AMAZON

Recibido el 22 de febrero de 2016; Aceptado el 17 de junio de 2016

Abstract

Several methods and domestic wastewater treatment stages have different potentials for greenhouse gas (GHG) production. This study estimated the emission of CH₄ and CO₂ of a sewage treatment line, in real scale for one year, in the municipality of Cacoal - RO and held a comparison of current emissions with the possible emissions if new treatment processes were adopted. The estimate of CH₄ was carried out by the IPCC method and an estimated amount of CO₂ was calculated from life cycle analysis (electricity and fuel used in WTP). The general issue of WTP was 6975.45 tons of carbon equivalent in the year. Simulating GHG emissions to other treatment systems, it was noted that emissions would be 99% lower for Activated Sludge Systems (conventional), 98.5% lower for Activated Sludge (extended aeration) and 3.5% higher for systems using UASB reactors followed by activated sludge system. Therefore, it concluded that the selection of domestic wastewater treatment methods should also take into consideration the potential for greenhouse gas emissions.

Keywords: emission of greenhouse gases, climate change, domestic wastewater treatment.

¹Departamento de Engenharia Ambiental, Faculdades Integradas de Cacoal.

²Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo.

*Autor correspondente: Av. Trabalhador São-carlense, 400. Centro, São Carlos, São Paulo, Brasil. CEP 13566-590. Telefone: (55) 16 34127296. Email: tiagocetrulo@usp.br

Resumo

Diversos métodos e etapas de tratamento de águas residuárias domésticas têm diferentes potenciais de produção de Gases de Efeitos Estufa (GEEs). Este estudo estimou a emissão de CH₄ e CO₂ no período de um ano de uma linha de tratamento de esgotos, em escala real, no município de Cacoal – RO e realizou uma comparação das emissões atuais com as possíveis emissões caso novos processos de tratamento fossem adotados. A estimativa de CH₄ foi realizada através do método do IPCC e a estimativa da quantidade de CO₂ foi calculada a partir de análise de ciclo de vida (energia elétrica e combustíveis). A emissão geral da ETE foi 6,975.45 toneladas de carbono equivalente no ano. Simulando emissões de GEEs para outros sistemas de tratamento, notou-se que as emissões seriam 99% menores para sistemas de Lodos Ativados (convencional), 98.5% menores para Lodos Ativados (aeração prolongada) e 3.5% maiores para sistemas que utilizam reatores UASB seguido de sistema de Lodos Ativados. Portanto, conclui-se que uma seleção de métodos de tratamento de efluentes domésticos também deve ser balizada pelo potencial de emissão de GEEs.

Palavras chave: emissão de gases de efeito estufa, mudanças climáticas, tratamento de águas residuárias domésticas.

Introdução

Os principais gases de efeito estufa (dióxido de carbono, metano, clorofluorcarbonetos, óxido nitroso e ozônio troposférico) são provenientes de diversas fontes, como retrata o relatório do Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2007; Watson *et al.*, 1990). De acordo com o relatório, o aumento da concentração de CO₂ advém, principalmente, do uso de combustíveis fósseis e das diversas maneiras e formas de uso do solo, enquanto, a principal fonte de CH₄ e de N₂O, é a agricultura. Além destas fontes globais de emissão existem diversas outras como os sistemas de tratamento de esgotos.

A formação de gases em sistemas de tratamento de esgotos está ligada às características que estes líquidos apresentam e aos processos de tratamento pelos quais estes passam, sendo os principais gases de efeito estufa emitidos por estes sistemas o CH₄, o CO₂ e o N₂O (Lins, 2010).

O CH₄ é o gás de maior relevância produzido no tratamento de esgotos. Sua formação advém do tratamento anaeróbico de águas residuárias, onde ocorre a metanogênese, com a presença de arqueas metanogênicas acetoclásticas ou que utilizam hidrogênio no seu metabolismo (Lins, 2010). Segundo Sardá *et al.* (2010), o CO₂ é proveniente, da degradação da matéria orgânica nos processos aeróbios e também pelo consumo de energia, reagentes e combustíveis. A produção de N₂O, de acordo com Lins (2010), é realizada por enzimas (nitrito redutase e oxido nítrico redutase) no processo de nitrificação e desnitrificação que agem na redução de NO₂⁻ e NO a N₂O.

Nesse contexto, é possível inferir que os diversos métodos e etapas de tratamento de águas residuárias domésticas têm diferentes potenciais de produção de GEEs. Isso é ainda mais

relevante quando se leva em consideração a diversidade de linhas de tratamento possíveis de serem arranjadas. Entende-se, portanto, que o potencial de emissão de GEEs também deve ser levado em conta na seleção dos métodos de tratamento de efluentes domésticos.

O presente trabalho estimou a emissão de metano e dióxido de carbono de uma linha de tratamento de esgotos em escala real no município de Cacoal – RO e comparou as emissões atuais com possíveis emissões futuras, caso novos processos de tratamento fossem adotados, contribuindo para demais estudos de emissão de GEEs em estações de tratamento de esgotos.

Método

Planta de tratamento

A estação de tratamento de efluentes domésticos – ETE de Cacoal está localizada sob as coordenadas geográficas 16º 26' 55.87" S e 68º 28' 20.24" O. A operadora é a SAAEC (Serviços de Abastecimento de Água e Esgoto de Cacoal) e o sistema é baseado em Lagoas de estabilização, que são sistemas de tratamento biológico, no qual a estabilização de matéria orgânica é realizada pela oxidação de bactérias e/ou pela redução fotossintética de algas. Como pode ser visto na Figura 1, o sistema é composto por duas linhas de tratamento, o mais antigo é um sistema Australiano, com 2 lagoas anaeróbias profundas (1 e 2) seguida de uma lagoa facultativa rasa (3); o sistema mais novo é constituído por duas lagoas facultativas profundas (4 e 5). As duas linhas de tratamento apresentam ainda gradeamento, caixa de areia e calha Parshall. No ano de 2014 o sistema atendia aproximadamente 50% da população do município, possuindo 11,202 ligações.

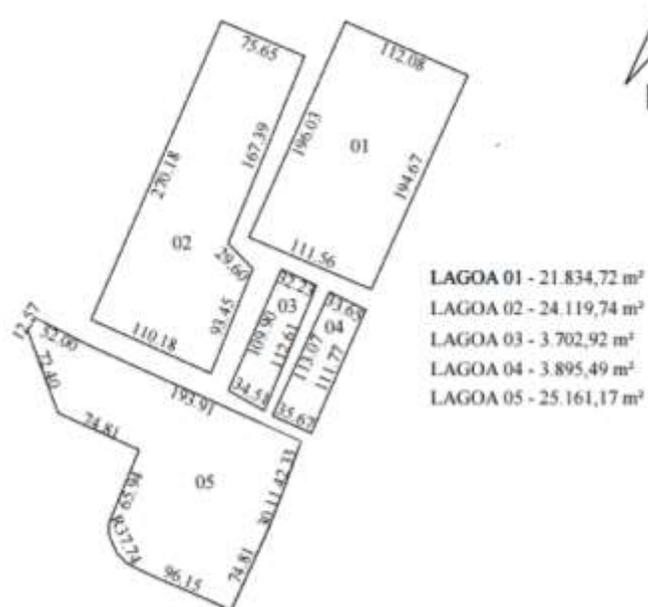


Figura 1. Desenho ilustrativo do Sistema de Tratamento de Efluentes do SAAEC. *Fonte: Autores.*

Procedimentos

Estimativas atuais da emissão de CH₄ e CO₂

Para a estimativa de emissão de CH₄ na ETE foi utilizado o método do IPCC (IPCC, 2006), demonstrado nas equações 01, 02 e 03.

$$\text{Emissão de } CH_4 = \left[\sum_j (T_j \cdot FE_j) \right] (CTO - L) - R \quad \text{Equação (1)}$$

onde:

T_j = porcentagem da população que utiliza a linha de tratamento j.

FE_j = fator de emissão (kg CH₄/kg DBO_{5,20}) de cada linha de tratamento j.

CTO = carga orgânica total na água residuárias (kg CH₄/ano)

L = carga orgânica removida como lodo (kg DBO_{5,20}/ano)

R = quantidade de CH₄ recuperada (kg CH₄/ano)

$$FE_j = MP * FCM_j \quad \text{Equação (2)}$$

onde:

FE_j = fator de emissão (kg CH₄/kg DBO_{5,20}) de cada linha de tratamento j.

MP = máxima produção de CH₄ (kg CH₄/kg DBO_{5,20})

FCM_j = fator de correção de CH₄

$$CTO = P * DBO * 0.001 * I * 365 \quad \text{Equação (3)}$$

onde:

CTO = carga orgânica total na água residuárias (kg CH₄/ano)

P = população (habitantes)

DBO = Demanda bioquímica de oxigênio per capita (g/habitante/dia)

I = Fator de correção devido à industrialização do local

Baseado no método IPCC (2006), a estimativa de emissão de CO₂ foi calculada multiplicando-se a quantidade utilizada de energia elétrica, combustíveis e reagentes na ETE Cacoal, no período de agosto de 2014 a julho de 2015, por seus respectivos fatores de emissão. Tais fatores de emissões foram determinados utilizando análise de ciclo de vida e encontram-se na Tabela 1, assim como os respectivos realizadores das análises. Os valores das emissões de N₂O não foram estimados, uma vez que não há processo de nitrificação ou desnitrificação. Os resultados de todos os cálculos de emissões de CH₄ foram convertidos para t CO₂eq baseado no potencial de aquecimento global do CH₄, adotando-se o valor 21, este valor significa que o CH₄ possui um potencial de aquecimento global 21 vezes maior do que o CO₂ dentro do período de 100 anos (IPCC, 2007). Os valores de emissão de CO₂ e metano foram somados para estimar o montante de GEEs.

Tabela 1. Fatores de emissão de CO₂

Entradas*	Fator de Emissão	Fonte
Energia elétrica**	86.21 g de CO ₂ eq/kWh	MIRANDA (2012)
Reagentes	0.785 t CO ₂ /tcal	IPCC (1997)

Entradas:* A quantidade de eletricidade e reagentes utilizados no período de agosto de 2014 a julho de 2015 e o tipo de reagentes e combustíveis empregados na ETE foram cedidas pelo SAAEC.

*Energia Elétrica**:* A eletricidade utilizada pelo SAAEC é contabilizada de forma total, não sendo possível saber a quantidade individual das estações de tratamento de efluente e de água (valor adotado de 50% para cada).

Estimativas da emissão de CH₄ e CO₂ para cenários

Para fins de comparação das emissões de GEEs, entre sistemas de tratamentos de esgotamento sanitário diferentes, foram estimadas as emissões de CH₄ e CO₂ para os sistemas de Lodos Ativados, que é um processo biológico e aeróbio, no qual o esgoto bruto do afluente e o lodo recirculado são misturados, e para Reatores UASB (Reatores Anaeróbios de Manta de Lodo e Fluxo Ascendente) seguido de sistema de lodos ativados. Esses cenários foram escolhidos, pois são os mais utilizados no Brasil.

O método utilizado para estimativa da emissão de CH₄ e CO₂ para os cenários foram os mesmos que para as atuais emissões, porém com fatores de consumo de energia elétrica específicos para a cada sistema de tratamento (Von Sperling, 2012), assim como fatores de correção de metano (FCM) específicos para cada sistema (IPCC, 2006; RTI, 2010). A Tabela 2 apresenta os fatores de consumo de energia e fatores de correção de metano utilizados.

Não foi realizada nenhuma simulação com nitrificação ou desnitrificação, uma vez que a operadora dos serviços não possui valores da quantidade de nitrogênio em seus resíduos. Dessa forma as emissões de N₂O não foram estimadas, apesar de ser importante no caso de sistemas que utilizem nitrificação ou desnitrificação.

Os resultados das emissões de CH₄ foram convertidos para t CO₂eq e somadas com as emissões diretas de CO₂ para estimar o volume total de GEEs emitidos.

Tabela 2. Sistemas de tratamento de esgoto e respectivos valores de FCM (fator de correção de metano) e fatores de consumo de energia elétrica.

FE _j	FCM	Consumo*
Lodos Ativados (Convencional)	0	18 – 26 kW/hab.ano
Lodos Ativados (Aeração Prolongada)	0	20 – 35 kW/hab.ano
Reator UASB – lodos ativados	0.8	14 – 20 kW/hab.ano

Consumo:* Consumo de energia elétrica pelos sistemas, segundo Von Sperling (2012).

Resultados

Emissões atuais

Por meio dos métodos descritos foi possível estimar as quantidades atuais de GEEs que são emitidas pela ETE de Cacoal no período entre agosto de 2014 e julho de 2015. Portanto, o trabalho estimou a quantidade de CH₄ (Tabela 3), CO₂ (Tabela 4) e GEEs (Tabela 5).

Tabela 3. Emissões totais de CH₄ (equações 01, 02 e 03) e variáveis.

	MP	FCM	FE	P	DBO	I	CTO	T	L	R	Total de CH ₄ (tCH ₄ /ano)
Linha de tratamento 1	0.6*	0.8**	0.36**	86,556	50*	1*	1579647	0.25	0	0	142.2
Linha de tratamento 2	0.6*	0.6**	0.48**	86,556	50*	1*	1579647	0.25	0	0	189.6
Total											331.7

* IPCC, 2006.

** RTI, 2010.

Tabela 4. Emissões totais de CO₂ e variáveis.

Energia consumida (kWh/ano)	Fator de emissão (g de CO ₂ eq/kWh)	CO ₂ - E (Kg/ano)	Reagentes consumidos (kg/ano)	Fator de emissão (tCO ₂ /tcal)	CO ₂ - R (Kg/ano)	Total de CO ₂ (tCO ₂ /ano)
108,592	86.21	9361.7	500	0.785	392.5	9.75

Tabela 5. Emissões totais de GEEs.

Total de CH ₄ (tCH ₄ /ano)	Total de CH ₄ (t CO ₂ eq/ano)	Total de CO ₂ (tCO ₂ /ano)	Total de GEEs (t CO ₂ eq/ano)
331.721	6,965.7	9.75	6,975.45

Como pode ser visto nas Tabelas 3, 4 e 5 a maioria das emissões de GEEs é proveniente da produção de metano pelos processos anaeróbios de decomposição da matéria orgânica. A linha de tratamento 1 produz mais metano, pois é composta por duas lagoas anaeróbias. A linha de tratamento 2, apesar de ser composta somente por lagoas facultativas, teve uma produção muito alta devido a profundidade das lagoas (3.8 metros em média).

A produção de GEEs proveniente da utilização de energia elétrica, combustíveis e reagentes é bastante pequena, pois as lagoas não tem sistema de aeração, não há utilização de combustíveis e como reagente somente a cal foi utilizado numa pequena quantidade (500 kg) para controle da acidez.

A produção total de metano da estação de tratamento de efluentes domésticos foi de 331.7 toneladas, o que é equivalente a 6,965.7 toneladas de carbono. A produção total de dióxido de carbono foi de 9.75 toneladas. A emissão geral da ETE foi 6,975.45 toneladas de carbono equivalente.

Emissões para os cenários

Os resultados que seguem nas tabelas são provenientes de simulações de emissões de GEEs para outros sistemas de tratamento de efluentes domésticos, mas mantendo as mesmas quantidades de geração atuais.

Tabela 6. Emissões totais de CH₄ (equações 01, 02 e 03) e variáveis para os cenários.

	MP	FCM	FE	P	DBO	I	CTO	T	L	R	Total de CH ₄ (tCH ₄ /ano)
ATUAL	Valores na Tabela 3										331.7
Lodos ativados (convencional)	0.6	0	0	86,556	50	1	1579647	0.5	-	-	0
Lodos ativados (AP)*	0.6	0	0	86,556	50	1	1579647	0.5	-	-	0
Reator UASB – lodos ativados	0.6	0.8	0.48	86,556	50	1	1579647	0.5	157964	0	341.20

* Aeração prolongada.

Tabela 7. Emissões totais de CO₂ e variáveis para os cenários.

	Consumo de energia (kWh/ano)	Fator de emissão (gCO ₂ eq/kWh)	CO ₂ - E (kg/ano)	Total de CO ₂ (tCO ₂ /ano)
ATUAL	Valores na Tabela 4		9361.7	9.361
Lodos ativados (convencional)	952,116*	86.21	73460.9	73.460
Lodos ativados (AP)	1,190,145*	86.21	102,602.4	102.602
Reator UASB – lodos ativados	735,726*	86.21	63,426.9	63.426

* Fonte: Von Sperling (2012).

Tabela 8. Emissões totais de GEEs para os cenários

	Total de CH ₄ (tCH ₄ /ano)	Total de CH ₄ (tCO _{2eq} /ano)	Total de CO ₂ (tCO ₂ /ano)	Total de GEEs (tCO _{2eq} /ano)
ATUAL		6,965.7	9.361	6,975.1
Lodos ativados (convencional)		0	73.460	73.5
Lodos ativados (AP)		0	102.602	102.6
Reator UASB – lodos ativados		7,165.2	63.426	7,228.6

Como demonstrado nas tabelas, as linhas de tratamento que utilizam sistemas anaeróbios de tratamento de efluentes domésticos emitem mais gases de efeito estufa que as linhas que contam com sistemas aeróbios. Fica claro que as emissões mais significativas de uma ETE provêm dos processos de metanogênese.

Discussão

As emissões totais atuais, provenientes do tratamento de esgotos sanitário no município de Cacoal-RO, são demasiadamente altas. Isso se deve a tipologia de sistema de tratamento adotado, baseado em sistemas anaeróbios. As unidades das linhas dos sistemas que não são anaeróbias (lagoas facultativas) acabam por assumir características de anaerobiose devido a sua grande profundidade, o que aumenta ainda mais a produção de metano, grande responsável pelas emissões totais.

Do ponto de vista das emissões de GEEs, os dados aqui demonstrados geram preocupação, uma vez que 59% dos sistemas de tratamento de esgoto utilizados no Brasil são lagoas de estabilização (IBGE, 2008). Porém, esses dados devem ser analisados com cuidado, uma vez que as características de lagoas facultativas profundas (encontradas em Cacoal) podem não ser a realidade para outros municípios. Para fins de comparação, caso Cacoal utilizasse na linha 2 lagoas facultativas rasas (< 2 metros) a emissão dessa linha seria de 995.2 t de CO_{2eq}/ano ao invés de 3,981.6 t de CO_{2eq}/ano, ou seja, uma redução em 75% na emissão de GEEs.

O fator de emissão por habitante atual é de 161.16 kg de CO_{2eq}/ano, valor bastante superior ao encontrado por Masuda *et al.* (2015), que foi de 44.64 kg de CO_{2eq}/ano, para um sistema que utiliza processos aeróbicos para degradação da matéria orgânica, mas que apresentou a produção de metano em pontos com baixa concentração de oxigênio dissolvido.

Esse fator de emissão por habitante é bastante elevado comparando com emissão anual de CO₂ per capita do Brasil que é de 7.8 t de CO₂/ano (Observatório do Clima, 2015). Ou seja, as emissões per capita em Cacoal, somente relativas ao tratamento dos efluentes domésticos, representam 2.07% da média de emissões de um brasileiro, sendo que para o Brasil, essa porcentagem é de 0.99%.

Em relação à comparação com outros sistemas de tratamento, observou-se que o sistema atual é um dos que mais produz GEEs, sendo que somente linhas que utilizassem unidades de reatores UASB seguidas de unidades de lodos ativados produziriam mais GEEs (3.5% a mais). Porém, os valores estimados de CH₄ para os sistemas que utilizam reatores UASB poderiam ser menores, pois estes sistemas apresentam facilidade para a condução dos gases emitidos para reaproveitamento ($R \neq 0$), como a queima ou a geração de energia elétrica.

Os outros dois cenários, utilizando lodos ativados da forma convencional ou com aeração prolongada, emitiriam quantidades bem inferiores de GEEs, respectivamente reduziram as emissões em 99% e 98.5%. Apesar de serem sistemas com alta utilização de energia para estabilização aeróbica do lodo, emitem pequenas quantidades de GEEs. A não emissão de metano por esses sistema é responsável pelas pequenas emissões de GEEs, porém deve se levar em conta que a emissão zero de metano só é possível em sistemas que não tenham áreas com baixa concentração de oxigênio dissolvido, onde pode ocorrer a metanogênese (Masuda et al., 2015).

Os fatores de emissão per capita para os cenários foram 1.7 kg de CO₂eq/ano (sistema de lodos ativados convencional), 2.37 kg de CO₂eq/ano (sistema de lodos ativados com aeração prolongada) e 167 kg de CO₂eq/ano (UASB seguida de lodos ativados). Comparando esses fatores com a emissão per capita brasileira, verifica-se que as emissões provenientes dois primeiros sistemas seriam bem menores (0.02% e 0.03% respectivamente) enquanto do sistema UASB-lodos ativados seria mais que o dobro, 2.14%.

Conclusão

Há diferença significativa nas emissões de GEEs de plantas de tratamento de efluentes domésticos. No estudo apresentado as emissões estimadas foram de 6,975.1 t de CO₂eq/ano para o sistema atual, baseado em lagoas de estabilização (lagoas anaeróbicas e aeróbicas profundas), 73.5 t de CO₂eq/ano para um sistema convencional de lodos ativado, 102.6 t de CO₂eq/ano para um sistema de lodos ativados com aeração prolongada e 7,228.6 t de CO₂eq/ano para um sistema com uma unidade UASB seguida de unidade de lodos ativados.

Isso equivale a diferenças significantes nas emissões totais de uma população. As porcentagens das emissões provenientes de tratamento de efluente pelo total de emissão foram 2.07% para o sistema atual e para os sistemas de lodos ativados (convencional), lodos ativados (aeração prolongada) e UASB-lodos ativados foram, respectivamente, 0.02%, 0.03% e 2.14%. Comparando a taxa brasileira, de 0.99% vê-se o impacto que a escolha dos sistemas de tratamento de efluentes domésticos pode causar nas emissões de GEEs.

Os critérios comumente utilizados para escolha de sistemas de tratamento de esgotos são: remoção de DBO, remoção de sólidos solúveis, remoção de nutrientes, remoção de patógenos, área requerida (ha/hab), potência requerida (W/hab), quantidade de lodo gerada, custo de implantação e custo de operação (VON SPERLING, 2012). Devido aos resultados encontrados nesse trabalho recomenda-se que a esses critérios sejam inseridas as emissões de GEEs, em termos de toneladas de carbono equivalente por habitante por ano (t de CO₂eq/hab.ano).

Referências bibliográficas

- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2008) *Pesquisa Nacional de Saneamento Básico - PNSB*. IBGE, Rio de Janeiro, 219 pp.
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change (2006) *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 5: Waste*. Edited: Eggleston, S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K. National Greenhouse Gas Inventories Programme, Institute for Global Environmental Strategies, Hayama, Kanagawa, Japan.
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change (2007) *The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Lins, G.A. (2010) *Avaliação de Impactos Ambientais em Estações de Tratamento de Esgotos (ETE)*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Masuda, S., Susuki, S., Sano, I. Li, Y., Nishimura, O. (2015) The seasonal variation of emission of greenhouse gases from a full-scale sewage treatment plant. *Chemosphere*, **140**(1), 167-173.
doi: 10.1016/j.chemosphere.2014.09.042.
- Miranda, M.M. (2012) *Fator de emissão de gases de efeito estufa da geração de energia elétrica no Brasil: implicações da aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 162 pp.
- Observatório do Clima (2015) *Análise das emissões de GEE no Brasil (1970-2013) e suas implicações para políticas públicas. Governos Locais pela Sustentabilidade (ICLEI)*, São Paulo, 52 pp.
- RTI, Research Triangle Institute (2010) *Greenhouse gas emissions estimation methodologies for biogenic emissions from selected source categories: solid waste disposal, wastewater treatment and ethanol fermentation*. Environmental Protection Agency, New York.
- Sardá, L.G., Higarashi, M.M., Muller, S., Oliveira, P.A., Comin, J.J. (2010) Redução de emissão de CO₂, CH₄ e H₂S através da compostagem de dejetos de suínos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, **9**(1), 1008-1013.
- Von Sperling, M. (2012) *Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, Vol. 4, Lodos ativados*, 3 ed, UFMG, Belo Horizonte, 428 pp.
- Watson, R.T., Rodhe, H., Oeschger, H., Siegenthaler, U. (1990) Greenhouse Gases and Aerosols. In: Houghton, J.T., Jenkins, G.J., Phraums, J.J. (Eds.), *Climate Change: The IPCC Scientific Assessment, Intergovernmental Panel 25 on Climate Change (IPCC)*, Cambridge University Press, Cambridge.