INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Estudo da Emissão de Metano da Bacia Amazônica utilizando Perfis Verticais com Avião

LUANA SANTAMARIA BASSO

**Dissertação apresentada como parte
dos requisitos para a obtenção do Grau
de Mestre em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear - Materiais**

ORIENTADORA:
Dra. LUCIANA VANNI GATTI

São Paulo
2011

AGRADECIMENTOS

À meus pais, Wilson Roberto Basso e Vivian Leila Santamaria Basso, e meu namorado, Anaor de Oliveira Teixeira, pelo amor, carinho, apoio, dedicação e compreensão incondicionais, sem os quais a realização deste trabalho não seria possível.

À minha família e amigos pelo carinho e apoio.

À Dra. Luciana Vanni Gatti, pela oportunidade, orientação, incentivo, apoio e amizade.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

À FAPESP e a NERC pelo apoio financeiro ao projeto.

Ao IPEN – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares e ao CQMA (Centro de Química e Meio Ambiente) pela infraestrutura e oportunidade de realizar o trabalho.

Aos amigos e colegas do LQA, Débora, Maria Helena, Amélia, Viviane, Alexandre, Caio, Lucas e Juan, pela amizade, apoio e colaboração na realização do trabalho.

À todos os colegas do IPEN pelo apoio e pela amizade.

ESTUDO DA EMISSÃO DE METANO DA BACIA AMAZÔNICA UTILIZANDO PERFIS VERTICAIS COM AVIÃO

Luana Santamaria Basso

RESUMO

O Metano (CH_4) é o segundo gás de efeito estufa mais importante, com aproximadamente 40% de sua emissão proveniente de fontes naturais, enquanto as fontes antrópicas representam cerca de 60%. Sua média global em 2009 foi de 1803ppb, que representa um aumento de 5ppb em relação ao ano anterior. Neste estudo foram calculados os fluxos de CH_4 , utilizando medidas de perfis verticais com aviões de pequeno porte, desde a superfície até 4,4km na Bacia Amazônica, sobre Santarém (SAN), Alta Floresta (ALF), Rio Branco (RBA) e Tabatinga (TAB), por meio do Método de Integração de Coluna. Estas medidas de CH_4 em escala regional até o presente momento são únicas e representam uma nova abordagem nas emissões nesta escala. As medidas em SAN foram realizadas entre 2000 e 2010 e o fluxo de CH_4 encontrado para este período foi de $53,0 \pm 27,9 \text{mgCH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$. Para o ano de 2010, o maior fluxo de emissão de CH_4 foi observado no lado leste da Bacia Amazônica, entre a costa e SAN, $56,4 \pm 22,4 \text{mgCH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$. Entre a costa e ALF, ao sul da Bacia Amazônica, o fluxo médio anual foi de $17,1 \pm 2,3 \text{mgCH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$, e entre a costa e os locais TAB e RBA, no lado oeste da Bacia, foi observado um fluxo médio anual de $18,7 \pm 4,2$ e $19,3 \pm 10,2 \text{mgCH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$, respectivamente. Extrapolando os resultados obtidos em TAB e RBA para toda a área da Bacia Amazônica (5 milhões Km^2) obtêm-se uma emissão de $34,7 \pm 13,5 \text{TgCH}_4 \cdot \text{ano}^{-1}$. Com o objetivo de determinar a influência da queima de biomassa no fluxo regional de emissão de CH_4 , foi utilizada a correlação $6,4 \text{ppbCO/ppbCH}_4$ calculada neste estudo, ALF foi o local de estudo que apresentou a maior influência no fluxo de CH_4 oriundo da queima de biomassa, 23% do fluxo total anual.

STUDY OF AMAZON BASIN METHANE EMISSIONS USING AIRPLANE VERTICAL PROFILES

Luana Santamaria Basso

ABSTRACT

Methane (CH_4) is the second most important greenhouse gas with approximately 40% of emission from natural sources, while anthropogenic sources account for about 60%. The global average was 1803ppb in 2009, representing an increase of 5ppb in relation to the previous year. This study calculated the fluxes of CH_4 , using measurements of vertical profiles with small aircraft, from the surface to 4.4km in the Amazon Basin, over Santarém (SAN), Alta Floresta (ALF), Rio Branco (RBA) and Tabatinga (TAB), using the Column Integration Technique. These measurements of CH_4 at a regional scale until now are unique and represent a new approach to emissions on this scale. SAN measurements were realized between 2000 and 2010 and CH_4 flux found for this period was $53.0 \pm 27.9 \text{mgCH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$. For the year 2010, the largest flux of CH_4 emission was observed in the eastern Amazon Basin, between the coast and SAN, $56.4 \pm 22.4 \text{mgCH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$. Between the coast and ALF, located in the south of the Amazon Basin, the annual mean flux was $17.1 \pm 2.3 \text{mgCH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$, and between the coast and the local TAB and RBA on the west side of the Basin was observed an mean annual flux of 18.7 ± 4.2 and $19.3 \pm 10.2 \text{mgCH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$, respectively. Extrapolating the results obtained in TAB and RBA for the whole area of the Amazon Basin (5 million km^2) to obtain an emission of $34,7 \pm 13,5 \text{TgCH}_4 \cdot \text{year}^{-1}$. In order to determine the influence of biomass burning on regional emission flux of CH_4 , was used a correlation 6.4ppbCO/ppbCH_4 calculated in this study, ALF was the site that had the most influence on the CH_4 flux from the burning biomass, 23% of the total annual flux.

SUMÁRIO

RESUMO.....	i
ABSTRACT	ii
SUMÁRIO.....	iii
LISTA DE TABELAS	v
LISTA DE FIGURAS.....	vi
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	13
2.1 Objetivo Geral	13
2.2 Objetivos Específicos	13
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1 Metano (CH ₄).....	14
3.1.1 Fontes e Sumidouros de CH ₄	17
3.1.2 Histórico da Concentração de CH ₄ na Atmosfera.....	21
3.1.3 Emissões de CH ₄ no Brasil.....	24
4 METODOLOGIA.....	27
4.1 Amostragem	29

4.2 Descrição dos Equipamentos e Análise	33
4.3 Precisão dos Resultados.....	35
4.4 Estabilidade do Sistema Analítico	36
4.5 Limpeza e Preparação das Malas de Amostragem	37
4.6 Cálculo do Fluxo de CH ₄ por meio do Método de Integração de Coluna.....	38
4.7 Estimativa da Emissão de CH ₄ por meio da Queima de Biomassa	43
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	46
5.1 Estudo das Trajetórias das Massas de Ar	46
5.2 Fluxo de CH ₄ entre a Costa Brasileira e SAN.....	48
5.3 Fluxo de CH ₄ da Bacia Amazônica.....	58
5.4 Verificação da regionalidade dos resultados de fluxo pela integração dos perfis verticais	67
5.5 Teste do erro devido a falta de medida acima de 4,4km de altitude	69
5.5 Fluxo de CH ₄ Proveniente da Queima de Biomassa	70
6. CONCLUSÕES	82
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição do Ar Seco e Não-Poluído (Adaptado de LENZI & FAVERO, 2009).....	1
Tabela 2: Potencial de Aquecimento Global e o tempo de permanência na atmosfera dos GEE (Adaptado de IPCC, 2007).....	16
Tabela 3: Estimativas globais das emissões e sumidouros de CH ₄ (TgCH ₄ .ano ⁻¹) (Adaptado de EPA, 2010).....	18
Tabela 4: Sumário das emissões antrópicas de CH ₄ no Brasil (Adaptado de MCT, 2010).....	25
Tabela 5: Plano de voo utilizado em ALF, RBA e TAB.....	32
Tabela 6: Plano de voo utilizado em SAN.	32
Tabela 7: Delimitação dos quadrantes da região entre a costa e SAN.	54
Tabela 8: Comparação dos fluxos de CH ₄ calculados com todas as altitudes do perfil e com as altitudes acima de 1000m.	67
Tabela 9: Comparação dos fluxos de CH ₄ calculados até 4,4km e até 10km.....	70
Tabela 10: Médias anuais dos fluxos de CH ₄ obtidos nos quatro locais de estudo...	78

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema da estrutura da atmosfera dividida em camadas (Fonte: AHRENS, 2000).	2
Figura 2: Esquema da camada limite planetária (Fonte: STULL, 1991).	3
Figura 3: Balanço radiativo sem a presença de gases de efeito estufa (a) e com eles (b) (Fonte: AHRENS, 2000).	3
Figura 4: Movimento vibratório: Estiramento da ligação (Fonte: BAIRD, 2002).	4
Figura 5: Movimento vibratório: Vibração de deformação angular (Fonte: BAIRD, 2002).	4
Figura 6: Balanço Global de energia em unidades de $W.m^{-2}$ (Fonte: IPCC, 2007).	6
Figura 7: Concentrações atmosféricas dos gases CO_2 , CH_4 e N_2O , ao longo dos últimos 2.000 anos (Fonte: IPCC, 2007).	7
Figura 8. Variações de deutério (δD) no gelo antártico, que é um indicador para a temperatura local, e as concentrações atmosféricas dos GEE, tais como: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O) no ar preso dentro de núcleos de gelo e das recentes medições atmosféricas. Os dados abrangem 650.000 anos e as bandas sombreadas indicam os períodos interglaciais quentes anteriores e atual (Fonte: IPCC, 2007).	8
Figura 9: Distribuição das estações que contribuem com dados para o WMO, em destaque a estação de Arembepe, no Brasil (Fonte: <i>World Data Center Greenhouse Gases/Agência Meteorológica Japonesa</i>).	9
Figura 10: Mapa político da Amazônia Legal (Fonte: http://www.imazon.org.br/novo2008/imagensdb/104112amazonia_legal.jpg , acesso em: abril de 2011).	10
Figura 11: Taxa de desmatamento bruto (Km^2ano^{-1}) de 1988 a 2010. (a) Média entre 1977 e 1988; (b) Média entre 1993 e 1994; (c) Taxa Estimada (Fonte: dados disponíveis em: http://www.obt.inpe.br/prodes/prodes_1988_2010.htm , acesso em abril de 2011).	11
Figura 12: Faixa de absorção de luz infravermelha do gás CH_4 (Adaptado de AHRENS, 2000).	15

Figura 13: Estimativas da média global da forçante radiativa (FR) e faixas em 2005 para o CO ₂ , o CH ₄ , o N ₂ O antrópicos e outros agentes e mecanismos importantes, juntamente com a extensão geográfica típica (escala espacial) do forçamento e o nível de compreensão científica avaliado. A forçante radiativa antrópica líquida e sua faixa também são mostradas (Fonte: IPCC, 2007).	15
Figura 14: Contribuição das emissões globais dos GEE por setor, em PgCO ₂ eq. (Fonte: http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/ghg/ghg5online.html , acesso em: junho de 2011).	16
Figura 15: Concentração global do CH ₄ atmosférico de 1984 até o final de 2009 (Fonte: WMO, 2010).	22
Figura 16: Variação média da concentração média mensal de CH ₄ para cada 20° latitude (Fonte: WMO, 2011).	22
Figura 17: Concentração média mensal de CH ₄ para o período entre 1984 e 2009 para cada 30° latitude (em preto) e sua tendência de longo tempo sem sazonalidade (em vermelho) (Fonte: WMO, 2011).	23
Figura 18: Taxa de crescimento da concentração do CH ₄ de 1984 até o final de 2009 (Fonte: WMO, 2010).	23
Figura 19: Imagem do Brasil destacando os quatro pontos de amostragem deste trabalho na Bacia Amazônica.	27
Figura 20: Precipitação média para o período entre 1931 e 1990 para o Brasil. (Fonte: INMET).	28
Figura 21: Sistema de coleta de ar semiautomático: (a) Unidade Compressora (b) Mala de Amostragem contendo os frascos.	29
Figura 22: Tubo coletor instalado no avião para a coleta de ar. A) avião bimotor com coleta na janela e B) avião monomotor com coleta na asa.	30
Figura 23: Esquema da trajetória em formato helicoidal descendente realizada pelo avião de pequeno porte durante a amostragem de ar.	31
Figura 24: Sistema MAGICC 3/Brasil – Sistema de análise de GEE no LQA/IPEN. 1- Monitor LI-COR (CO ₂); 2 - Monitor de CO/H ₂ Peak Laboratories (CO/H ₂); 3 - Cromatógrafo gasoso HP (N ₂ O/SF ₆ /CH ₄); 4 - Controlador de fluxo dos gases; 5 -	

Válvula “ <i>Sample select e System select</i> ”; 6 - <i>sample/CO reference</i> ; 7 - Medidor de vácuo e Receptor de amostras; 8 - Interface do cromatógrafo; 9 - Banho resfriador; 10 - Microcomputador; 11 - Monitor, 12 - Interface do monitor de CO ₂ , 13 - Interfaces das válvulas e do monitor CO/H ₂	33
Figura 25: Esquema de funcionamento nas posições de carregamento da amostra “LOAD” (a) e injeção na coluna “INJECT” (b).....	34
Figura 26: Calibração do gás CH ₄ de cilindro de intercomparação da WMO (azul) com 30 análises ($1820,59 \pm 2.15$ ppb) e o gás referência (vermelho).....	36
Figura 27: Calibrações dos cilindros de CH ₄ a partir de 2007, (linha preta) a concentração média; (linha vermelha) desvio padrão das medidas; (azul) as concentrações.	37
Figura 28: Simulação da emissão de SF ₆ no planeta. A marcação em rosa destaca a área de estudo, a qual não possui emissão deste gás (OLIVIER et al., 1999).....	38
Figura 29: Concentrações médias dos perfis verticais de SF ₆ (ppt), em SAN (2000-2010) e em ALF, RBA e TAB (2010), e as concentrações em ASC e RPB.....	39
Figura 30: (a) exemplo de um perfil amostrado no dia 25/03/2009 sobre SAN. A linha azul representa a concentração BKG para este perfil. (b) perfil normalizado do dia 25/03/2009 utilizado para a integração no cálculo de fluxo.	41
Figura 31: Representação do modelo de caixa simplificado utilizado para o cálculo de fluxo pelo Método de Integração de Coluna.	42
Figura 32: Exemplos de trajetórias retrocedentes da massa de ar entre SAN e a costa brasileira, para o dia 14/01/2010 e 22/10/2010, utilizando o modelo HYSPLIT.	42
Figura 33: Exemplos de perfis verticais, durante a estação seca, escolhidos para calcular a razão CO/CH ₄	44
Figura 34: Fluxos de CO para todos os perfis de SAN (2000-2010), ALF, RBA e TAB (2010). A linha representa a média para a estação chuvosa do período que se considerou representante das emissões biogênicas ao longo do ano.	45

Figura 35: Trajetórias retrocedentes simuladas pelo modelo HYSPLIT (a) Tabatinga, (b) Santarém, (c) Rio Branco e (d) Alta Floresta; (vermelho) 500m, (verde) 2000m e (branco) 4000m.	46
Figura 36: Imagem das trajetórias retrocedentes simuladas pelo modelo HYSPLIT para SAN, para o período entre 2000 e 2010, (vermelho) 500m, (azul) 2000m e (branco) 4000m.	47
Figura 37: Imagem do Brasil destacando a área de representatividade de cada um dos quatro locais de estudo, ALF, RBA, SAN e TAB.	47
Figura 38: Perfis verticais amostrados sobre SAN entre 2000 e 2010, (azul escuro) perfis realizados entre janeiro e março; (azul claro) perfis realizados entre abril e julho e; (vermelho) perfis realizados entre agosto e dezembro.	48
Figura 39: Série temporal de CH ₄ para a média dos perfis verticais realizados, acima (azul) e abaixo (vermelho) da camada limite planetária, e as concentrações das duas estações de monitoramento global, Ascension (laranja) e Barbados (roxo) para este mesmo período.	49
Figura 40: Exemplos de perfis de temperatura e umidade relativa medidos simultaneamente nos perfis verticais em SAN.	50
Figura 41: Série temporal da concentração BKG de CH ₄ para SAN e nas estações de monitoramento global de ASC e RPB.	51
Figura 42: Fluxo de CH ₄ (mgCH ₄ .m ⁻² .dia ⁻¹) para a região entre a costa brasileira e SAN, entre os anos de 2000 e 2010 em azul o fluxo médio mensal e em rosa o fluxo obtido em cada perfil vertical realizado.	52
Figura 43: Fluxo de CH ₄ (mgCH ₄ .m ⁻² .dia ⁻¹), calculado com o tempo igual a 2 dias, para a região entre a costa brasileira e SAN entre os anos de 2000 e 2010, em azul o fluxo médio mensal e em rosa o fluxo obtido em cada perfil vertical realizado.	53
Figura 44: Pluviometria mensal da região entre a costa brasileira e SAN, entre os anos de 2001 e 2010 (Fonte: HyDIS, http://hydis8.eng.uci.edu/hydis-unesco/).	54
Figura 45: Focos de queimadas da região entre a costa brasileira e SAN, entre os anos de 2000 e 2010 (Fonte: http://www.dpi.inpe.br/proarco/bdqueimadas/).	55

- Figura 46: Precipitação por satélite (HyDIS) para a região entre a costa e SAN, (coluna azul) média da precipitação entre os anos de 2001 e 2009 e (coluna vermelha) precipitação para o ano de 2010. E o fluxo médio mensal de CH_4 obtido nesta região no período entre 2000 e 2009 (símbolos azuis) e para o ano de 2010 (símbolos vermelhos).56
- Figura 47: Focos de queimadas para a região entre a costa e SAN, (azul) média dos focos entre 2000 e 2009 e (vermelho) número de focos para o ano de 2010.57
- Figura 48: Série temporal do fluxo de CH_4 para a região entre a costa brasileira e SAN, entre os anos de 2000 e 2010.57
- Figura 49: Concentração de CH_4 em ppb, para cada perfil realizado, em azul escuro os perfis realizados nos meses da estação chuvosa e em vermelho os perfis da estação seca.59
- Figura 50: Série temporal de CH_4 para a média dos perfis verticais realizados em (a) ALF, (b) RBA, (c) SAN e (d) TAB, acima (azul) e abaixo (vermelho) da camada limite planetária, e as concentrações das duas estações de monitoramento global, ASC (laranja) e RPB (roxo) para este mesmo período.60
- Figura 51: Série temporal da concentração BKG de CH_4 para ALF, RBA, SAN e TAB e nas estações de monitoramento global de ASC e RPB.61
- Figura 52: Fluxos médios mensais de CH_4 ($\text{mgCH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$) obtidos nos quatro locais de amostragem na Bacia Amazônica, ALF, RBA, SAN e TAB.62
- Figura 53: Mapa do Brasil contendo o fluxo de CH_4 ($\text{TgCH}_4 \cdot \text{ano}^{-1}$) referente a área de representatividade de cada local de amostragem, entre a costa brasileira e (rosa) SAN, (amarelo) ALF, (azul) TAB e (branco) RBA.63
- Figura 54: Os dez Estados com maior rebanho de búfalos no Brasil para o ano de 2009. (Fonte: IBGE, <http://seriesestatisticas.ibge.gov.br/series.aspx?vcodigo=PPM01&t=efetivo-dos-rebanhos-por-tipo-de-rebanho>, acesso em: março de 2011).64
- Figura 55: Imagem de satélite da localização de (a) Santarém e (b) Ilha do Marajó (Fonte: Google Mapas, acesso em: maio de 2011).64
- Figura 56: Total mensal do teor total de água no solo para o período entre 2004 e 2008, o valor obtido em cada mês foi subtraído da média calculada para o período entre janeiro de 2003 a dezembro de 2007 (Fonte: GLDAS, disponíveis em:

ftp://podaac-ftp.jpl.nasa.gov/allData/tellus/L3/gldas_monthly/browse/ , acesso em: maio de 2011).	65
Figura 57: Trajetórias retrocedentes de SAN por mês, (vermelho) 500m; (laranja) 1000m; (amarelo) 1500m; (verde) 2000m; (azul claro) 2500m; (anil) 3000m; (lilás) 3500m; (branco) 4000m; e (preto) 4500m.	66
Figura 58: Comparação do fluxo de CH ₄ com todas as altitudes do perfil vertical (azul) e o fluxo recalculado para ALF, RBA, SAN e TAB sem as altitudes abaixo de 1000m (vermelho).	68
Figura 59: Exemplos dos perfis verticais realizados; (azul) concentrações medidas nos perfis e (vermelho) as concentrações adotadas para o cálculo do fluxo até 10km.	69
Figura 60: Mapa dos quatro locais de amostragem comparando os fluxos (TgCH ₄ .m ⁻² .dia ⁻¹) calculados até 4,4km e os fluxos até 10km; (rosa) SAN, (amarelo) ALF, (azul) TAB e (branco) RBA.	70
Figura 61: Média mensal do fluxo total de CH ₄ (preto), fluxo do CH ₄ biogênico (verde) e fluxo do CH ₄ oriundo da queima de biomassa (vermelho) de 2000 a 2010 obtido na região entre a costa e SAN.	71
Figura 62: Média mensal do fluxo total de CH ₄ (preto), fluxo do CH ₄ biogênico (verde) e fluxo do CH ₄ oriundo da queima de biomassa (vermelho) para o ano de 2010 obtido na região entre a costa e ALF.	72
Figura 63: Pluviometria mensal da região entre a costa brasileira e ALF, para o ano de 2010 (vermelho) e a média entre os anos de 1998 e 2010 (azul) (Fonte: TRMM, http://gdata1.sci.gsfc.nasa.gov/daac-bin/G3/gui.cgi?instance_id=TRMM_3-Hourly).	73
Figura 64: Focos de queimadas da região entre a costa brasileira e ALF, para o ano de 2010 (Fonte: http://www.dpi.inpe.br/proarco/bdqueimadas/).	73
Figura 65: Trajetórias retrocedentes de ALF calculadas pelo modelo HYSPLIT, (vermelho) 500m; (laranja) 1000m; (amarelo) 1500m; (verde) 2000m; (azul claro) 2500m; (anil) 3000m; (lilás) 3500m; (branco) 4000m; e (preto) 4500m; e os focos de queimada para os respectivos meses.	74

Figura 66: Média mensal do fluxo total de CH ₄ (preto), fluxo do CH ₄ biogênico (verde) e fluxo do CH ₄ oriundo da queima de biomassa (vermelho) para o ano de 2010 obtido na região entre a costa e RBA.....	75
Figura 67: Pluviometria mensal da região entre a costa brasileira e RBA, para o ano de 2010 (vermelho) e a média entre os anos de 1998 e 2010 (azul) (Fonte: TRMM, http://gdata1.sci.gsfc.nasa.gov/daac-bin/G3/gui.cgi?instance_id=TRMM_3-Hourly).	75
Figura 68: Focos de queimadas da região entre a costa brasileira e RBA, para o ano de 2010 (Fonte: http://www.dpi.inpe.br/proarco/bdqueimadas/).	76
Figura 69: Média mensal do fluxo total de CH ₄ (preto), fluxo do CH ₄ biogênico (verde) e fluxo do CH ₄ oriundo da queima de biomassa (vermelho) para o ano de 2010 obtido na região entre a costa e TAB.	76
Figura 70: Pluviometria mensal da região entre a costa brasileira e TAB, para o ano de 2010 (vermelho) e a média entre os anos de 1998 e 2010 (azul) (Fonte: TRMM, http://gdata1.sci.gsfc.nasa.gov/daac-bin/G3/gui.cgi?instance_id=TRMM_3-Hourly).	77
Figura 71: Focos de queimadas da região entre a costa brasileira e TAB, para o ano de 2010 (Fonte: http://www.dpi.inpe.br/proarco/bdqueimadas/).	78
Figura 72: Mapa do Brasil contendo os fluxos de CH ₄ (TgCH ₄ .ano ⁻¹) referentes a área de representatividade de cada local de amostragem, entre a costa brasileira e (rosa) SAN, (amarelo) ALF, (azul) TAB e (branco) RBA para a emissão biogênica (esquerdo) e oriunda de queima de biomassa (direito).	79
Figura 73: Imagens do Brasil mostrando o “ <i>footprint</i> ” de cada região de estudo, (a) TAB; (b) SAN; (c) RBA; (d) ALF.	79
Figura 74: Mapa de usos da terra no Brasil até o ano de 2006 (Fonte: GUILHOTO e ICHIHARA, 2010).	80
Figura 75: Mapa da criação de gado no Brasil até o ano de 2008, segundo os dados da Produção Pecuária Municipal (PPM) do IBGE. (Fonte: GUILHOTO e ICHIHARA, 2010).	81

1 INTRODUÇÃO

A atmosfera terrestre é uma camada gasosa e composta principalmente pelos gases nitrogênio molecular (N_2 , aproximadamente 78% das moléculas) e oxigênio molecular (O_2 , em torno de 21% das moléculas) (BAIRD, 2002). Os outros gases e partículas somam apenas 1%, estes são os gases-traço encontrados em geral na ordem de partes por milhão (ppm) e partes por bilhão (ppb) (TAB.1). Alguns desses componentes têm a capacidade de absorver energia na forma de calor, os gases de efeito estufa (GEE).

Tabela 1: Composição do Ar Seco e Não-Poluído (Adaptado de LENZI & FAVERO, 2009).

Gases Permanentes			Gases Variáveis			
Gás	Símbolo	Porcentagem (de volume) em base seca	Gás e partículas	Símbolo	Porcentagem (de volume)	Partes por milhão (ppm)
Nitrogênio	N_2	78,08	Vapor d'água	H_2O	0 a 4	
Oxigênio	O_2	20,95	Dióxido de Carbono	CO_2	0,037	368
Argônio	Ar	0,93	Metano	CH_4	0,00017	1,7
Néon	Ne	0,0018	Óxido Nitroso	N_2O	0,00003	0,3
Hélio	He	0,0005	Ozônio	O_3	0,000004	0,04
Hidrogênio	H_2	0,00006	Partículas		0,000001	0,01-0,15
Xenônio	Xe	0,000009	Clorofluorcarbono (CFC)		0,00000002	0,0002

Em termos gerais, a atmosfera é dividida em camadas segundo suas características de variação de temperatura (AHRENS, 2000). A variação da temperatura à medida que se afasta perpendicularmente da superfície da Terra tem um comportamento que depende principalmente das interações entre a radiação solar com os componentes da atmosfera. Principalmente em função desta variação da temperatura a atmosfera é estratificada em camadas: troposfera, estratosfera,

mesosfera, termosfera e exosfera (LENZI & FAVERO, 2009). As camadas da atmosfera estão apresentadas na FIG.1 juntamente com o perfil da temperatura.

Figura 1: Esquema da estrutura da atmosfera dividida em camadas (Fonte: AHRENS, 2000).

A troposfera é a camada mais próxima da superfície da Terra, se estende do nível do mar até aproximadamente 11km de altura. É caracterizada pelo declínio da temperatura com o aumento da altitude (média de $-6,5^{\circ}\text{C.Km}^{-1}$). Quando a temperatura se estabiliza, ou seja, a taxa de decaimento é zero, é marcado o fim da troposfera, esta camada de temperatura constante é denominada tropopausa, onde este estudo está inserido. Dentro desta camada, ocorrem outras camadas segundo a dinâmica da variação da temperatura, tal como mostra a FIG.2. As estruturas das camadas variam de acordo com a hora do dia. Existe uma camada denominada camada limite planetária, ou camada de mistura ou ainda outras denominações. Esta camada varia de 600m (sobre o oceano) a 2km em áreas urbanas. Sua altitude depende das características da superfície. Existe ainda a camada noturna, que se forma a partir do pôr do sol e é rompida após o nascer do sol e consequente aquecimento da camada acima do solo. Esta camada tem a altitude máxima de 300m.

Durante milhões de anos a Terra passou por ciclos naturais de aquecimento e resfriamento. Processos naturais, além de processos de intensa atividade geológica, lançaram à superfície gases com capacidade de absorver energia na faixa de calor (infravermelho) criando um efeito estufa natural, com uma temperatura média de 15°C. Caso não existissem estes gases a temperatura do planeta seria -18°C (FIG.3).

Figura 2: Esquema da camada limite planetária (Fonte: STULL, 1991).

Figura 3: Balanço radiativo sem a presença de gases de efeito estufa (a) e com eles (b) (Fonte: AHRENS, 2000).

O termo efeito estufa deve-se à existência de gases na atmosfera, como o dióxido de carbono (CO_2), o vapor d'água (H_2O), o metano (CH_4), o óxido nitroso (N_2O) e o ozônio (O_3), que têm a propriedade de absorver energia na forma de calor, que é emitida pela crosta terrestre e o redirecionam de volta à atmosfera, impedindo que a radiação da superfície regresse ao espaço, mantendo assim a troposfera aquecida, fazendo com que a temperatura média global aumente. Essas moléculas

absorvem energia quando a frequência de movimento de onda da luz se iguala a frequência de seu movimento interno, a luz é absorvida praticamente de forma total. Os principais movimentos de vibração na faixa de comprimento de onda emitido pela Terra são o estiramento de ligação e a deformação angular. Uma molécula ainda pode absorver energia devido ao aumento de sua energia rotacional.

O estiramento de ligação é o movimento oscilatório de dois átomos ligados, X e Y, entre si (FIG.4), este movimento ocorre em todas as ligações e em todas as moléculas sob todas as condições de temperatura, mesmo no zero absoluto. A frequência exata do movimento oscilatório depende principalmente do tipo de ligação e da identidade dos dois átomos envolvidos, por exemplo, na ligação C-H no CH₄ a frequência de estiramento não se encontra na região do infravermelho térmico.

Figura 4: Movimento vibratório: Estiramento da ligação (Fonte: BAIRD, 2002).

O movimento de vibração de deformação angular (FIG.5) é uma oscilação na distância entre dois átomos X e Z ligados a um átomo comum Y, mas não ligados um ao outro. Esse movimento altera o ângulo de ligação XYZ. Todas as moléculas contendo três átomos ou mais apresentam vibrações de deformação angular. As frequências de muitos tipos de deformação angular encontram-se na região do infravermelho térmico.

Figura 5: Movimento vibratório: Vibração de deformação angular (Fonte: BAIRD, 2002).

As moléculas possuem a capacidade de absorver luz infravermelha sobre uma curta faixa de frequências, em vez de apenas a uma única frequência, isto ocorre porque não é apenas a energia associada à vibração que é alterada quando um fóton infravermelho é absorvido, ocorre também uma variação na energia rotacional da molécula em torno de seu próprio eixo. Essa energia pode ser tanto

ligeiramente aumentada quanto ligeiramente diminuída quando a luz infravermelha é absorvida para aumentar sua energia vibracional. Assim, a absorção de fótons ocorre em frequências ligeiramente maiores ou menores que aquelas que correspondem à da vibração.

O sistema climático é um sistema complexo e interativo, que consiste na atmosfera, superfície terrestre, a neve e o gelo, oceanos e outros corpos de água, e os demais corpos vivos. Os componentes atmosféricos caracterizam o clima que geralmente é definido como a média e a variabilidade de temperatura, precipitação e vento durante um período de tempo, variando de meses a milhões de anos (o período clássico é de 30 anos) (IPCC, 2007). O sistema climático evolui no tempo sob a influência da sua própria dinâmica interna e devido a mudanças nos fatores externos que afetam o clima (chamado de "forçantes"), exemplos de fatores externos são atividades humanas na alteração da composição atmosférica e erupções vulcânicas. A radiação solar alimenta o sistema climático que naturalmente mantém-se em equilíbrio, na FIG.6 observa-se o Balanço Global de Energia na atmosfera terrestre, segundo dados publicados pelo IPCC (2007).

A energia solar (por área) que penetra no sistema terrestre é cerca de 342W.m^{-2} , dos quais 107W.m^{-2} são diretamente refletidos de volta ao espaço, sendo que 77W.m^{-2} são refletidos pelas nuvens, partículas e gases existentes na atmosfera e 30W.m^{-2} são refletidos pela superfície, e 67W.m^{-2} são absorvidos por partículas e gases da atmosfera. Os restantes 168W.m^{-2} são absorvidos pela superfície terrestre, esta utiliza 24W.m^{-2} para liberação de calor sensível, 78W.m^{-2} para evapotranspiração e emite 390W.m^{-2} na forma de radiação infravermelha. Somando o total de energia que a superfície da Terra emite tem-se 492W.m^{-2} , contra 168W.m^{-2} que a mesma recebe do Sol. O equilíbrio é mantido pelos gases de efeito estufa (GEE) que absorvem 155W.m^{-2} da energia infravermelha emitida pela Terra e redireciona 324W.m^{-2} novamente para a superfície, que somados aos 168W.m^{-2} oriundos do Sol, totalizam os 492W.m^{-2} de energia que a superfície terrestre utiliza ou emite. Com isso a temperatura da Terra permanece constante, em média em 15°C .

Figura 6: Balanço Global de energia em unidades de $W.m^{-2}$ (Fonte: IPCC, 2007).

As atividades humanas contribuem para as alterações climáticas, provocando mudanças na atmosfera da Terra, nas concentrações atmosféricas de GEE e aerossóis. A radiação solar que penetra no sistema terrestre e a radiação infravermelha que é emitida pela Terra podem ser alteradas pelos GEE e aerossóis, afetando o balanço de energia da Terra e o clima. Alterando a abundância na atmosfera ou as propriedades desses gases e partículas podendo levar a um aquecimento ou resfriamento do sistema climático.

Ao longo dos últimos séculos vem ocorrendo um crescimento acentuado da população mundial, consequentemente há um aumento da atividade industrial, agrícola, pecuária, de transporte e uso de energia, principalmente o uso de combustíveis fósseis, que vem afetando o clima global (CONTI, 2005), pois um aumento na concentração dos GEE vem ocorrendo ao longo dos últimos 100 anos. Esta intervenção humana no ciclo global de carbono ocorre há milhares de anos, entretanto somente nos dois últimos séculos o fluxo antropogênico passou a ser comparável ao ciclo do carbono natural (MALHI et al., 2002).

A FIG.7 apresenta a concentração na atmosfera dos GEE CO_2 , CH_4 e N_2O , ao longo dos últimos 2.000 anos, nota-se que desde 1750 estas concentrações apresentaram um crescimento e este é atribuído às atividades humanas desde a era industrial.

Figura 7: Concentrações atmosféricas dos gases CO₂, CH₄ e N₂O, ao longo dos últimos 2.000 anos (Fonte: IPCC, 2007).

O aquecimento global vem acarretando sérios danos ao já delicado equilíbrio climático, algumas consequências notáveis deste aquecimento já foram observadas, como o derretimento de geleiras nos pólos e o aumento de dez centímetros no nível do mar em um século. A Organização Mundial da Saúde (OMS) estimou que as mudanças climáticas podem provocar até 150 mil mortes todos os anos e ao menos cinco milhões de casos de doenças. Além dos problemas de saúde, as temperaturas elevadas vão reduzir as geleiras e a precipitação de neve prejudicando o fornecimento de água em algumas regiões do mundo (MARENGO, 2007).

Existem modelos que se estiverem corretos, preveem um aumento na temperatura global nas próximas décadas podendo variar entre 2,4°C e 6,4°C. Estes modelos são desenvolvidos a partir de dados de amostragem e são constantemente alterados com a obtenção de novas informações, seja diminuindo a sua confiabilidade quando a previsão feita é muito distante da realidade observada, ou aumentando-a se a previsão é próxima. Os últimos resultados divulgados mostraram um aumento de temperatura de aproximadamente 0,74°C no último século (IPCC, 2007).

Dados de testemunhos de gelo, tanto Ártico como Antártico, fornecem registros das concentrações dos gases da atmosfera durante os últimos 650.000 anos (FIG.8). Em função da circulação de ar as precipitações de neve registram os

anos mais frios, mais quentes, assim como concentrações maiores ou menores de gás carbônico, oxigênio e outros gases das diferentes eras geológicas. Baseados nessas evidências, os cientistas chegaram à conclusão de que o aumento da concentração dos GEE na atmosfera é o responsável pelo atual aquecimento do planeta.

Figura 8. Variações de deutério (δD) no gelo antártico, que é um indicador para a temperatura local, e as concentrações atmosféricas dos GEE, tais como: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O) no ar preso dentro de núcleos de gelo e das recentes medições atmosféricas. Os dados abrangem 650.000 anos e as bandas sombreadas indicam os períodos interglaciais quentes anteriores e atual (Fonte: IPCC, 2007).

Em projetos de pesquisas que tiveram início nos anos 80 e continuam até hoje, tenta-se, por meio de modelagem computacional, prever as consequências do aumento da concentração global dos GEE sobre o clima do planeta no futuro, no entanto, existem algumas incertezas, como o fato de ainda não se entender integralmente todas as fontes e sumidouros desses gases, além da maior parte das medidas realizadas ocorrerem no Hemisfério Norte.

De acordo com a FIG.9, observam-se os locais hoje monitorados pela Organização Mundial de Meteorologia (WMO - *World Meteorological Organization*)

(~300 localidades) em parceria com diversos laboratórios, que alimentam os modelos de previsão de mudanças climáticas. Nota-se a existência de apenas um local com medidas contínuas desses gases no Brasil incorporado nesta rede, localizada na costa leste brasileira, em Arembepe, na Bahia, pertencente à rede de estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), onde o Laboratório de Química Atmosférica (LQA) do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) realizava as medidas de GEE, mas teve suas atividades encerradas pelo INMET, no ano de 2010. Sendo este um país tropical, contendo 50% da floresta tropical do globo terrestre, a Amazônia (MALHI & GRACE, 2000), faz-se necessário obter estudos e pesquisas para garantir o devido monitoramento das concentrações dos GEE.

Figura 9: Distribuição das estações que contribuem com dados para o WMO, em destaque a estação de Arembepe, no Brasil (Fonte: *World Data Center Greenhouse Gases/Agência Meteorológica Japonesa*).

A Floresta Amazônica é reconhecida como a maior floresta tropical existente e possui uma grande variedade de ecossistemas, dentre os quais se destacam as matas de terra firme, as florestas inundadas, as várzeas, os igapós, os campos abertos e os cerrados. Abrigando uma infinidade de espécies vegetais e animais. Abrange uma área de aproximadamente 8 milhões de km², contendo o Brasil cerca de 60% desta, aproximadamente 5 milhões de Km², ocupando os Estados do Acre, Amapá, Amazonas, Pará, Rondônia, Roraima e parte dos Estados do Maranhão, Tocantins e Mato Grosso (FIG.10) (MCT, 2010).

A Amazônia representa cerca de 50% das florestas tropicais do globo terrestre, com uma das maiores reservas de carbono acima e abaixo da terra, abrigando cerca de um quarto da biodiversidade global (MALHI & PHILLIPS, 2005). Desempenha um papel fundamental no controle do regime de precipitação e umidade em grande parte do continente sul americano e detém grande parte da água doce do planeta. A Amazônia está sobre forte pressão humana devido a fatores como o desmatamento, a conversão e o esgotamento da floresta, alterando a composição atmosférica, contribuindo com as mudanças climáticas e o aquecimento global.

Figura 10: Mapa político da Amazônia Legal (Fonte: http://www.imazon.org.br/novo2008/imagensdb/104112amazonia_legal.jpg, acesso em: abril de 2011).

O desmatamento é a atividade humana que afeta diretamente as maiores áreas de floresta da Amazônia brasileira (FEARNSIDE, 2003). A taxa anual de desmatamento na Amazônia não é constante, apresentando flutuações ano a ano conforme mostra a FIG.11 e a partir do ano de 2005 esta taxa vem decaindo. A principal causa do desmatamento antropogênico da Amazônia é o uso da terra (PRODES, 2008), sendo o pasto para gado e a fazenda de produção de soja em grande escala as duas formas dominantes na Região Amazônica.

Figura 11: Taxa de desmatamento bruto ($\text{Km}^2\text{ano}^{-1}$) de 1988 a 2010. (a) Média entre 1977 e 1988; (b) Média entre 1993 e 1994; (c) Taxa Estimada (Fonte: dados disponíveis em: http://www.obt.inpe.br/prodes/prodes_1988_2010.htm, acesso em abril de 2011).

Este estudo é parte integrante do Projeto Amazônica, consórcio de pesquisadores Europeus e Brasileiros, um projeto interdisciplinar, que faz parte do Experimento de Grande-Escala entre a Biosfera-Atmosfera da Amazônia (LBA - do inglês, *Large Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia*). Este é um programa multidisciplinar com a finalidade de entender o funcionamento dos ecossistemas amazônicos em todas as suas vertentes, além de estudá-los como uma entidade regional no sistema terrestre, assim como as causas e efeitos das mudanças na região. A motivação dos estudos realizados no LBA é pelo reconhecimento de que a Amazônia está sob rápida e intensa transformação em seu processo de desenvolvimento e ocupação (LBA-2, 2007). Assim, objetiva estudar como as mudanças no uso e cobertura da terra e no clima poderão afetar os processos biológicos, químicos e físicos, e o desenvolvimento sustentável na região, além de sua interação com o clima regional e global.

Em dezembro de 2000, no projeto LBA, iniciaram as medidas de GEE em perfil vertical utilizando aviões de pequeno porte sobre a Floresta Nacional do Tapajós, próximo a Santarém, no Pará, com o objetivo de validar os dados obtidos

em torres de fluxo de CO₂ na Amazônia e avaliar o comportamento desta em escala regional.

A motivação deste projeto foi estudar a contribuição da Amazônia na emissão do GEE Metano (CH₄) em escala regional. Este é considerado entre os gases primários como o segundo GEE mais importante, devido a sua concentração na atmosfera, sendo a sua média global em 2009 de 1803ppb, e ao seu Potencial de Aquecimento Global (PAG), que é 21 vezes maior que o CO₂ em um cenário de 100 anos e sua forçante radiativa representa aproximadamente 18% da média total global (WMO, 2010).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Determinar a contribuição da Amazônia no balanço global de CH_4 , por meio do cálculo de fluxo, em escala regional, pelo Método de Integração de Coluna.

2.2 Objetivos Específicos

1. Analisar os resultados dos perfis verticais realizados utilizando aviões de pequeno porte, em Santarém (SAN), sobre a Floresta Nacional do Tapajós (2°S, 54°O), no Estado do Pará; em Alta Floresta (ALF) (8°S, 56°O), no Estado do Mato Grosso; em Rio Branco (RBA) (10°S, 68°O), no Estado do Acre; e em Tabatinga (TAB) (5°S, 70°O), no Estado do Amazonas.
2. Determinar a concentração de CH_4 no ar de entrada no continente, utilizando como traçador o gás hexafluoreto de enxofre (SF_6) e as concentrações medidas nas Estações Globais de Ascension (Hemisfério Sul - 8°S, 14°O) e Barbados (Hemisfério Norte - 14°N, 59°O), pertencentes à rede global de monitoramento de GEE da NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*).
3. Calcular as trajetórias das massas de ar que chegam às regiões estudadas utilizando o modelo computacional HYSPLIT (*Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model*) para cada perfil vertical e a cada 500m de altura, entre 500 até 4500m de altitude.
4. Calcular o fluxo de CH_4 sobre a região estudada em escala regional, utilizando o Método de Integração de Coluna.
5. Determinar a emissão de CH_4 oriundo de queima de biomassa utilizando o CO como traçador a partir da relação CO/CH_4 para a Floresta Amazônica e assim determinar a fração biogênica da emissão do CH_4 .

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Metano (CH₄)

O CH₄ é um importante GEE e seu tempo de vida atmosférico é estimado em 12 anos (IPCC, 2007). É também o mais abundante dos gases traço reativos na troposfera e sua reatividade é importante tanto para a química da troposfera quanto da estratosfera. A oxidação do CH₄ pelo radical hidroxila (OH) na troposfera leva à formação de formaldeído (CH₂O), de monóxido de carbono (CO) e de ozônio (O₃), na presença de níveis suficientemente altos de óxidos de nitrogênio (NO_x). Junto com o CO, o CH₄ ajuda a controlar a quantidade de OH na troposfera. O CH₄ afeta também as concentrações de vapor de água e de O₃ na estratosfera, e desempenha um papel fundamental na conversão de cloro reativo a ácido clorídrico (HCl) menos reativo na estratosfera (WUEBBLES & HAYHOE, 2002).

Foi detectado na atmosfera em 1948 por Marcel V. Migeatte, mas sua importância para o clima só foi recentemente revelada por três importantes descobertas. Em 1976, Wei-Chyung Wang e colaboradores do GISS (*Goddard Institute for Space Studies*) da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) revelaram que o CH₄ é um GEE de importância significativa na atmosfera. A segunda descoberta resultou da análise de núcleos de gelo da Groelândia e Antártida, retirados através de perfuração profunda da camada de gelo, onde os pesquisadores conseguiram isolar gases capturados em minúsculas bolhas de ar. Os gases CO₂ e CH₄ dentro destas bolhas mostraram que suas concentrações vêm sofrendo um rápido crescimento desde o período pré-industrial, sendo que a concentração de CH₄ mais que dobrou nos últimos 150 anos. E a terceira descoberta é resultado de uma investigação feita por Jeff Severinghaus usando técnicas em geoquímica baseadas nos isótopos de nitrogênio que reagem a mudanças rápidas de temperatura, mostrando que o CH₄ aumenta rapidamente com o aquecimento climático, com um pequeno atraso em relação a temperatura. Assim, o CH₄ não somente afeta o clima através do efeito estufa, mas também é afetado por ele (SCHIMIDT, 2004).

Uma molécula de CH₄ contém quatro ligações C—H. Embora as vibrações de estiramento da ligação C—H ocorram fora da região do infravermelho (IR) térmico, as vibrações de deformação angular da ligação H—C—H absorvem a 7,7μm (FIG.12), próximo do limite da janela do IR térmico, consequentemente o CH₄ absorve IR nesta região (BAIRD, 2002).

Figura 12: Faixa de absorção de luz infravermelha do gás CH₄ (Adaptado de AHRENS, 2000).

O CH₄ é considerado entre os gases primários como o segundo GEE mais importante (FIG.13 e 14), devido a sua concentração na atmosfera e ao seu Potencial de Aquecimento Global (PAG), que é 21 vezes maior que o CO₂ em um cenário de 100 anos (TAB.2) e sua forçante radiativa de 48Wm² e que representa aproximadamente 18% da média total global (FIG.12).

Figura 13: Estimativas da média global da forçante radiativa (FR) e faixas em 2005 para o CO₂, o CH₄, o N₂O antropicos e outros agentes e mecanismos importantes, juntamente com a extensão geográfica típica (escala espacial) do forçamento e o nível de compreensão científica avaliado. A forçante radiativa antropica líquida e sua faixa também são mostradas (Fonte: IPCC, 2007).

Tabela 2: Potencial de Aquecimento Global e o tempo de permanência na atmosfera dos GEE (Adaptado de IPCC, 2007).

Espécies	Conc. 1990	Tempo de vida (anos)	Potencial de Aquecimento Global		
			T=20 anos	100 anos	500 anos
CO ₂	352ppm		1	1	1
CH ₄	1675ppb	12	72	21	7.6
N ₂ O	310ppb	114	289	310	153
CFCl ₃	275ppt	50	5000	4000	1400
CF ₂ Cl ₂	468ppt	102	7900	8500	4200
CF ₂ ClCFCl ₂	51ppt	85	5000	5000	2300
CF ₂ HCl	111ppt	13,3	4300	1700	520
CH ₃ CF ₂ Cl	-	19,5	4200	2000	630
CCl ₄	105ppt	42	2000	1400	500
CH ₃ CCl ₃	150ppt	5,4	360	110	35
CH ₂ FCF ₃	-	14	3300	1300	420
SF ₆	~3ppt	3200	16300	23900	32600

Source: EDGAR 4.0 (JRC/PBL, 2009)

Figura 14: Contribuição das emissões globais dos GEE por setor, em PgCO₂eq. (Fonte: <http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/ghg/ghg5online.html>, acesso em: junho de 2011).

3.1.1 Fontes e Sumidouros de CH₄

As fontes antrópicas de CH₄ para a atmosfera excedem as fontes naturais, aproximadamente 60% da emissão global de CH₄ para a atmosfera é proveniente de fontes antrópicas, como a queima de combustíveis fósseis e de biomassa, os ruminantes, a cultura de arroz, dentre outros, enquanto as fontes naturais, como as áreas alagadas, representam cerca de 40% (WMO, 2010). Devido à variedade de suas fontes, as emissões de CH₄ são afetadas por vários fatores, incluindo o uso de energia, a distribuição da população humana, as práticas agrícolas e o clima (WUEBBLES & HAYHOE, 2002).

O CH₄ é produzido fundamentalmente em condições de anaerobiose encontradas em áreas alagadas e em ecossistemas sedimentares por meio de duas vias principais que são a fermentação do acetato (CH₃COOH) e a redução do CO₂ com o hidrogênio (H₂) como fonte de elétron (SUGIMOTO & WADA, 1995). A produção de CH₄ é a etapa final do fluxo de carbono em habitats anaeróbicos, a conversão da matéria orgânica a CH₄ ocorre sob anaerobiose através da cooperação entre diferentes culturas microbianas.

As arqueias metanogênicas, microrganismos anaeróbios obrigatórios que requerem condições anóxicas de crescimento e altamente redutoras, convertem uma extensão relativamente limitada de substratos simples para CH₄, em habitats com substratos orgânicos complexos, interagem com outros microrganismos anaeróbios que catabolizam substratos complexos em substratos simples (PAZINATO, 2007).

A TAB.3 apresenta as estimativas globais e as variações das emissões e sumidouros por fontes naturais de CH₄ para a atmosfera segundo a EPA- *Environmental Protection Agency* (2010). A maior emissão proveniente das fontes naturais são as áreas alagadas, que contribuem com 170TgCH₄.ano⁻¹. As emissões provenientes das latitudes tropicais representam a maior contribuição aos fluxos globais entre 61% e 75% do total das emissões de CH₄ provenientes de áreas alagadas do mundo.

Tabela 3: Estimativas globais das emissões e sumidouros de CH₄ (TgCH₄.ano⁻¹) (Adaptado de EPA, 2010).

Fontes	Metano (TgCH ₄ .ano ⁻¹)	
	Emissões estimadas ^(a)	Faixa de variabilidade ^(b)
Áreas alagadas	170,3	
- Norte	42,7	24 - 72
- Tropical	127,6	81 - 206
Solos terra firme e zonas ribeirinhas	-30	-
Oceanos, estuários e rios	9,1	2,3 – 15,6
<i>Permafrost</i>	0,5	0 - 1
Lagos	30	10 - 50
Hidratos		2 – 9 ^(c)
Fontes geológicas terrestres e marinhas		42 - 64
Incêndios florestais		2 - 5
Vegetação		0 ou 20 - 60
Artrópodes terrestres ^(d)	20	2 - 22
Animais selvagens	8	2 - 15
Total (fontes naturais)	208	Ver nota ^(e)
Total (fontes naturais e antropogênicas)	566	503 – 610
Fontes naturais como porcentagem do total	37%	Ver nota ^(e)

^(a) Em alguns casos, uma estimativa pontual não pode ser previsto, devido à grande incerteza.

^(b) Os intervalos apresentados podem refletir uma compilação de várias estimativas diferentes. As estimativas publicadas variam em parte devido à incerteza na estimativa do número global de fontes pontuais e difusas e as médias anuais de emissões de cada fonte individual ou fonte por área.

^(c) As estimativas de emissão de hidratos correspondem ao fluxo de CH₄ para o oceano, pois a maior parte é susceptível de ser oxidado na coluna d'água do oceano.

^(d) As estimativas para os artrópodes terrestres incluem cupins. Estima-se que outros artrópodes, podem contribuir com até 100TgCH₄.ano⁻¹.

^(e) Como a contribuição relativa das emissões de cada fonte para a concentração total não são independentes uns dos outros (isto é, se uma fonte está no extremo inferior do seu intervalo estimado, outra pode estar na maior), os intervalos não podem ser somados.

Como pode ser observado na TAB.3, os lagos emitem cerca de 30TgCH₄.ano⁻¹ para a atmosfera (estes dados não incluem represamentos e reservatórios, por serem considerados fontes antrópicas). A produção de CH₄ depende da temperatura, da disponibilidade de matéria orgânica e da falta de oxigênio, estes fatores são influenciados pelo clima, tamanho e profundidade do lago, e pela produtividade das plantas e animais. A expansão em terras alagadas que ocorre por inundação para produzir mais energia hidrelétrica soma-se a esse

total. O volume de CH_4 produzido após inundações depende significativamente da profundidade e da área dos reservatórios (BAIRD, 2002).

As represas hidrelétricas em áreas tropicais, como a Amazônia Brasileira, emitem CH_4 por decomposição de plantas e outros organismos biológicos sob condições anaeróbicas no fundo do reservatório. O CH_4 é liberado através de vários caminhos, inclusive por bolhas e difusão pela superfície, e é liberado no transcurso da água pelas turbinas e vertedouros. A vegetação herbácea, de fácil decomposição, cresce rapidamente na área do fundo do reservatório que fica exposta quando o nível da água é periodicamente rebaixado. Quando o nível d'água sobe, a biomassa se decompõe no fundo do reservatório, produzindo CH_4 (FEARNSIDE, 2008).

Recentemente as plantas foram consideradas uma possível fonte de emissão de CH_4 . Em 2006, Keppler et al. (2006) observou a produção efetiva de CH_4 em laboratório sob condições aeróbicas a partir de folhas vivas e mortas, estimando uma emissão global entre 62 e $236\text{TgCH}_4.\text{ano}^{-1}$ a partir de plantas vivas e $0,5$ a $6,6\text{TgCH}_4.\text{ano}^{-1}$ a partir de plantas mortas. Estes resultados geraram muitos questionamentos da comunidade científica e diversos estudos têm sido realizados para verificar a emissão direta de CH_4 em plantas vivas em condições aeróbicas. Alguns estudos obtiveram resultados que comprovam estas emissões das plantas enquanto outros não encontram nenhuma evidência. Segundo a EPA (2010), TAB.3, devido ao número limitado de estudos que tentaram medir as emissões de CH_4 provenientes de plantas em condições aeróbicas, os resultados conflitantes dos estudos e o fato de que o mecanismo de produção de CH_4 pelas plantas ainda não foi identificado, deve-se incluir a possibilidade de que as plantas não são de fato uma fonte direta de CH_4 nas estimativas de emissões globais. Baseando-se nas informações atualmente disponíveis, estima-se que as plantas não emitem CH_4 ou se for confirmado que as plantas emitem CH_4 , estima-se uma emissão entre 20 e $60\text{TgCH}_4.\text{ano}^{-1}$.

A queima de biomassa, tais como florestas e pastagens em áreas tropicais e semitropicais, libera CH_4 em quantidades de cerca de 1% do carbono consumido, junto com grandes quantidades de monóxido de carbono (CO), ambos

os compostos são produtos da combustão incompleta (BAIRD, 2002). De acordo com a EPA (2010) as emissões de CH_4 global por incêndios florestais são estimadas entre 2 e 5Tg.ano^{-1} , porém somente são considerados os incêndios causados por relâmpagos ou iniciados acidentalmente por humanos e não são considerados os incêndios antrópicos, por exemplo, a queima de biomassa. Contudo é extremamente difícil distinguir entre as áreas queimadas por incêndios florestais naturais e pelos incêndios antropogênicos, o que dificulta quantificar as emissões de CH_4 provenientes de incêndios naturais em relação ao total de todas as queimadas. Estimativas das emissões de CH_4 por incêndio natural estão baseadas na suposição de que cerca de 10% da queima de biomassa global é natural, embora esta proporção possa variar de ano para ano.

Animais ruminantes, como o gado bovino, búfalos, ovelhas e certos animais selvagens, produzem grandes quantidades de CH_4 como subproduto em seus estômagos quando digerem a celulose da qual se alimentam. A intensidade de emissão depende do tipo de animal, do tipo e da quantidade de alimento, do seu grau de digestibilidade e da intensidade da atividade física do animal, em função das diversas práticas de criação (MCT, 2010). Quando o material orgânico dos dejetos animais é decomposto sob condições anaeróbicas, bactérias metanogênicas podem produzir quantidades consideráveis de CH_4 . Essas condições são favorecidas quando os dejetos são estocados na forma líquida (em lagoas, charcos e tanques) (EMBRAPA, 2006).

Globalmente, os ruminantes são responsáveis por aproximadamente 85Tg das 550TgCH_4 emitidos anualmente. Há, no entanto, uma considerável incerteza associada com as estimativas de CH_4 provenientes de animais devido a pouca disponibilidade de dados para documentar a variabilidade que existe na criação (MCGINN et al., 2006).

Cupins e outros artrópodes terrestres também produzem CH_4 como resultado da degradação bacteriana de matéria orgânica ingerida, sendo contribuinte pequeno, mas não insignificante para as emissões de CH_4 mundial, estima-se que estes emitem entre 2 e $22\text{TgCH}_4.\text{ano}^{-1}$. Animais ruminantes selvagens (como bisões,

veados, alces, cabras e ovelhas, e algumas espécies de pequenos roedores) emitem um fluxo estimado entre 2 e 15TgCH₄.ano⁻¹ (EPA, 2010).

O tratamento de resíduos é outra fonte de CH₄, a matéria orgânica contida nos resíduos dos aterros de lixo e no tratamento anaeróbico de esgoto e águas residuais é decomposta pela ação de bactérias metanogênicas produzindo o CH₄. O crescimento demográfico, combinado com mudanças de hábitos, melhoria da qualidade de vida e desenvolvimento industrial, causa um aumento na quantidade gerada de resíduos e em suas características. A geração de CH₄ varia de local para local, em função de fatores como quantidade de resíduos, idade do depósito, presença de ambiente anaeróbico, materiais tóxicos, acidez e condições construtivas e de manejo (CETESB, 2006).

Em contraste com as diversas fontes de CH₄, há apenas três sumidouros de CH₄ na troposfera. Uma vez emitido o CH₄ permanece na atmosfera por cerca de 8 anos antes da sua remoção, principalmente por oxidação química da troposfera (IPCC, 2007). A reação com o radical livre hidroxila (OH) é o sumidouro dominante de CH₄ atmosférico, responsável por cerca de 90% de sua perda para o ar. A quantidade de CH₄ removida é limitada pelos níveis OH e pela constante de velocidade da reação. As concentrações de OH não são afetadas apenas pelas emissões diretas de CH₄, mas por seus produtos de oxidação, especialmente o CO (WUEBBLES & HAYHOE, 2002). Os outros sumidouros são consumo por microrganismos do solo e a perda para a estratosfera (BAIRD, 2002; IPCC, 2007). A absorção de CH₄ pela oxidação dos solos sob vegetação natural (incluindo terra firme e matas ciliares) por microrganismos é estimada em 30TgCH₄.ano⁻¹ (EPA, 2010).

3.1.2 Histórico da Concentração de CH₄ na Atmosfera

A concentração do CH₄ na atmosfera era de aproximadamente 700ppb no período pré-industrial, porém o aumento das emissões por fontes antropogênicas são responsáveis pelo incremento de 158% nesta concentração, sendo a sua média global em 2009 de 1803ppb, que representa um crescimento total de 258% em relação ao período pré-industrial (FIG.15) (WMO, 2010).

Figura 15: Concentração global do CH_4 atmosférico de 1984 até o final de 2009 (Fonte: WMO, 2010).

As taxas de crescimento da concentração do CH_4 variam em uma escala global. As variações sazonais desta concentração são maiores no Hemisfério Norte do que no Hemisfério Sul, este aumento no Hemisfério Norte se estende para o Hemisfério Sul (FIG.16). Esta grande variação latitudinal na concentração de CH_4 das latitudes médias do Hemisfério Norte e nos trópicos, sugerem maiores fontes de CH_4 nas altas e médias latitudes do Hemisfério Norte e sumidouros nos trópicos, onde a concentração de radicais OH é maior (WMO, 2011).

Figura 16: Variação média da concentração média mensal de CH_4 para cada 20° latitude (Fonte: WMO, 2011).

A FIG.17 mostra a concentração média mensal de CH_4 para o período entre 1984 e 2009 para cada região de 30° de latitude. Observa-se que a menor magnitude das variações sazonais está registrada na região entre o equador e 30°S.

Figura 17: Concentração média mensal de CH_4 para o período entre 1984 e 2009 para cada 30° latitude (em preto) e sua tendência de longo tempo sem sazonalidade (em vermelho) (Fonte: WMO, 2011).

Uma característica fundamental da taxa de crescimento global do CH_4 é a sua variabilidade interanual atual (FIG.18). Na década de 1990, esta taxa diminuiu, porém manteve-se positiva, especialmente durante o período entre 1992 e 1996, quando estas taxas foram inferiores a 5ppb.ano^{-1} . Em 1998, a taxa de crescimento global aumentou para cerca de 11ppb.ano^{-1} . Este incremento ocorreu nas altas e médias latitudes do Hemisfério Norte, onde as taxas de crescimento foram maiores que 15ppb.ano^{-1} . Em 2000 e 2001, esta taxa diminuiu para cerca de -1ppb.ano^{-1} , e entre 2002 e 2003, estas taxas foram maior no Hemisfério Norte, especialmente nas altas e médias latitudes, onde atingiu cerca de 10ppb.ano^{-1} . A taxa de crescimento global foi de -3ppb.ano^{-1} em 2004 e de 1ppb.ano^{-1} em 2005.

Figura 18: Taxa de crescimento da concentração do CH_4 de 1984 até o final de 2009 (Fonte: WMO, 2010).

Apesar das grandes taxas de crescimento em 1998 e entre 2002 e 2003, durante os eventos de El Niño, a concentração média global foi relativamente

estável entre 1999 e 2006. Entretanto, a concentração média global voltou a aumentar, um total de 18ppb entre 2007 e 2009.

O grande aumento na taxa de crescimento de CH_4 em 1991 pode ter sido causado pela diminuição dos níveis de radicais OH na atmosfera devido à radiação UV reduzida resultante da erupção do Monte Pinatubo em 1991 (DLUGOKENCKY et al., 1996), e a consequente redução em 1992 pode ter sido devido a um aumento de radicais OH, resultantes da depleção do ozônio estratosférico na sequência desta erupção (BEKKI et al., 1994). Em 1998, as taxas de crescimento foram elevadas em todo o globo, o que pode ter ocorrido devido ao aumento das emissões em altas latitudes do norte e nas áreas alagadas tropicais causadas por altas temperaturas e pelo aumento da precipitação, bem como pela queima de biomassa nas florestas boreais, principalmente na Sibéria (DLUGOKENCKY et al., 2001). As taxas de crescimento foram baixas entre 1999 e 2006, com uma exceção durante o evento El Niño entre 2002 e 2003. As causas destas diminuições nas taxas de crescimento do CH_4 continuam incertas. Desde 2007, a concentração do CH_4 na atmosfera voltou a aumentar e as razões prováveis são: uma emissão média maior em áreas alagadas nas altas latitudes do Hemisfério Norte durante o ano de 2007, devido a temperaturas excepcionalmente quentes e emissões tropicais durante 2007 e 2008, relacionadas a um aumento da precipitação em áreas alagadas durante um episódio de La Niña. Porém, as razões para o aumento da concentração de CH_4 não são completamente compreendidas e há uma incerteza com relação a continuidade deste aumento neste ritmo (DLUGOKENCKY et al., 2009; WMO, 2010).

3.1.3 Emissões de CH_4 no Brasil

Segundo o Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT) na Segunda Comunicação Nacional à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (2010), no ano de 2005 as emissões de CH_4 foram estimadas em 18,1Tg (TAB.4). Este inventário inclui apenas as emissões antrópicas por fontes e sumidouros de GEE não controlados pelo Protocolo de Montreal (MCT, 2010).

No Brasil, o setor de Agropecuária é o maior responsável pelas emissões de CH_4 , sendo a principal emissão, 90% do total, decorrente da fermentação entérica do rebanho de ruminantes (11,5Tg), quase toda referente ao gado bovino, o

segundo maior rebanho do mundo. O manejo de dejetos de animais, a cultura do arroz irrigado e a queima de resíduos agrícolas corresponderam às emissões restantes. No setor de Mudança do Uso da Terra e Florestas as emissões de CH₄ ocorrem pela queima da biomassa nas áreas de desflorestamento. Essas emissões representaram 17% (3,0Tg) do total de emissões de CH₄ em 2005. São consideradas neste setor as emissões associadas a conversão da floresta para agricultura ou pecuária, a substituição de uma lavoura por reflorestamento e também a queima de biomassa.

Tabela 4: Sumário das emissões antrópicas de CH₄ no Brasil (Adaptado de MCT, 2010).

Setor	1990	1994	2000	2005	Participação 2005	Variação 1990-2005
	(Gg)				(%)	
1. Energia	427	382	388	541	3,0	26,7
1.1 Queima de Combustíveis:	336	296	267	344	1,9	2,4
1.1.1 Subsetor energético	169	148	125	165	0,9	-2,6
1.1.2 Subsetor industrial	58	55	54	72	0,4	24,8
1.1.2.1 Indústria siderúrgica	40	37	35	46	0,3	14,1
1.1.2.2 Outras indústrias	18	19	19	27	0,1	48,3
1.1.3 Subsetor transporte	11	12	11	10	0,1	-2,9
1.1.4 Subsetor residencial	76	64	62	77	0,4	1,9
1.1.5 Outros Setores	22	17	15	19	0,1	-13,5
1.2 Emissões Fugitivas	91	87	122	197	1,1	115,6
1.2.1 Mineração de Carvão	50	42	43	49	0,3	-1,0
1.2.2 Extração e transporte de petróleo e gás natural	42	44	78	148	0,8	254,5
2. Processos industriais (indústria química)	5	7	9	9	0,1	79,2
3. Agropecuária	9.539	10.237	10.772	12.768	70,5	33,9
3.1 Fermentação Entérica	8.419	8.995	9.599	11.487	63,4	36,4
3.1.1 Gado bovino	8.004	8.579	9.256	11.129	61,5	39,0
3.1.1.1 Gado de leite	1.198	1.263	1.178	1.371	7,6	14,5
3.1.1.2 Gado de corte	6.807	7.316	8.078	9.757	53,9	43,4
3.1.2 Outros animais	415	416	344	358	2,0	-13,7
3.2 Manejo de dejetos de animais	635	675	678	723	4,0	13,8
3.2.1 Gado bovino	191	205	216	254	1,4	32,8
3.2.1.1 Gado de leite	36	38	34	40	0,2	10,6
3.2.1.2 Gado de corte	155	167	182	214	1,2	38,0
3.2.2 Suínos	373	387	365	358	2,0	-4,1
3.2.3 Aves	48	61	78	92	0,5	89
3.2.4 Outros animais	22	23	19	20	0,1	-12,2
3.3 Cultura de arroz	363	436	393	426	2,4	17,2
3.4 Queima de resíduos agrícolas	121	131	101	133	0,7	9,7
4. Mudança do uso da terra e florestas	1.996	2.238	3.026	3.045	16,8	52,5
5. Tratamento de resíduos	1.227	1.369	1.658	1.743	9,6	42,0
5.1 Lixo	792	897	1.060	1.104	6,1	39,5
5.2 Esgoto	436	472	598	639	3,5	46,7
5.2.1 Industrial	95	103	190	206	1,1	116,8
5.2.2 Doméstico	341	369	408	433	2,4	27,2
Total	13.195	14.223	15.852	18.107	100	37,2

Segundo a Base de dados EDGAR versão 4.0 (*Emissions Database for Global Atmospheric Research*) as emissões de CH₄ no Brasil no ano de 2005 foram de 23,4Tg, que representa 7% da emissão total global de CH₄. As emissões provenientes da queima de biomassa das florestas correspondem a 17% (4,4Tg) das emissões totais brasileiras e as emissões provenientes da fermentação entérica foram de 13,1Tg.

Na Amazônia foi estimada, por sensoriamento remoto e medições de campo, uma emissão em áreas alagadas de 29TgCH₄.ano⁻¹ em 5 milhões Km² (MELACK, et al., 2004). Carmo et al. (2006), realizaram medições em três torres utilizadas para estudos micrometeorológicos, em regiões de floresta de terra firme na Amazônia Brasileira durante a estação seca e chuvosa estimando uma emissão de CH₄ que varia entre 2 e 21mgCH₄.m⁻².dia⁻¹ sem observar diferença clara entre as estações seca e chuvosa. Este resultado foi extrapolado para uma área de 5 milhões de km² resultando em um fluxo de CH₄ anual entre 4 e 38Tg.ano⁻¹. Querino et al. (2011), por meio de medidas realizadas na Reserva Biológica de Cuieiras utilizando a técnica de *Eddy Covariance*, observaram um aumento mais significativo no fluxo de CH₄ dois meses após o início da estação chuvosa, sendo o fluxo médio encontrado de 2,8mgCH₄.m⁻².dia⁻¹, extrapolando este resultado para a área da Bacia Amazônica (5 milhões de km²), o fluxo médio anual estimado é de 5TgCH₄.ano⁻¹.

Por meio de medidas realizadas em perfis verticais de avião sobre duas regiões da Floresta Amazônica, Manaus e Santarém, Miller et al. (2007) obtiveram um fluxo médio de 27mgCH₄.m⁻².dia⁻¹, extrapolando este fluxo médio para 5 milhões de Km², obtêm-se uma emissão de 49TgCH₄.ano⁻¹.

4 METODOLOGIA

Sendo o objetivo deste trabalho determinar a emissão de CH_4 pela Bacia Amazônica, foram escolhidos 4 locais na Bacia para os estudos de perfis verticais, utilizando avião de pequeno porte, formando um grande retângulo, de maneira a representar toda a Bacia Amazônica. As concentrações encontradas nos perfis verticais refletem a resultante de todos os processos que ocorrem desde a costa brasileira até o local de coleta, portanto o percurso da massa de ar é que define a área representativa de cada local estudado. Os quatro locais onde foram realizados os perfis verticais na Floresta Amazônica foram: Santarém (SAN), no Pará, sobre a Floresta Nacional do Tapajós, em Tabatinga (TAB), no Amazonas; Rio Branco (RBA), no Acre e Alta Floresta (ALF), no Mato Grosso, com medidas de CH_4 entre as altitudes de 300m a 4420m (FIG.19).

Figura 19: Imagem do Brasil destacando os quatro pontos de amostragem deste trabalho na Bacia Amazônica.

Os estudos realizados em SAN com perfis verticais, sobre a Floresta Nacional do Tapajós (2,86°S; 54,95°O) iniciaram-se em dezembro de 2000 e serão apresentados até dezembro de 2010. As amostras coletadas a partir de dezembro de 2000 até 2003 foram coletadas no Brasil e analisadas no Laboratório de Gases de Efeito Estufa da NOAA, em Boulder, no Colorado/EUA e a partir de 2004, as análises foram realizadas no Brasil, no Laboratório de Química Atmosférica (LQA) do IPEN (Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares), São Paulo.

A partir de dezembro de 2009 foram iniciados perfis verticais de avião de pequeno porte em RBA (9,38°S, 67,62°O), no Estado do Acre e em TAB (5,96°S, 70,06°O), no Amazonas. Estas duas localidades situadas na região Norte do país, foram escolhidas para representar o extremo ocidental da Bacia Amazônica Brasileira. TAB representa uma região menos impactada pela ocupação humana, com o maior índice pluviométrico da Bacia, conforme pode ser observado na FIG.20, enquanto que RBA representa uma área onde o impacto das atividades antrópicas é superior ao de TAB. A região representada por ALF (8,80°S, 56,75°O), localizada no extremo norte do Estado de Mato Grosso representa uma área mais ao sul da Bacia e também mais impactada com atividades agrícolas, apresentando menor índice de precipitação e estando situada no limite do “Arco do Fogo”.

Figura 20: Precipitação média para o período entre 1931 e 1990 para o Brasil. (Fonte: INMET).

4.1 Amostragem

As amostras de perfis verticais de avião foram coletadas utilizando um sistema semiautomático de coleta, que consiste em duas malas (FIG.21), desenvolvidas pelo ESRL/NOAA. A primeira mala contém dois compressores e baterias recarregáveis e permanece no local amostrado. A segunda mala contém 17 frascos de vidro (utilizada em SAN) e 12 frascos (utilizadas nos demais locais de amostragem), válvulas para amostragem e um microprocessador que controla a amostragem e armazena informações sobre a mesma.

Figura 21: Sistema de coleta de ar semiautomático: (a) Unidade Compressora (b) Mala de Amostragem contendo os frascos.

Para a coleta foram utilizadas aeronaves de pequeno porte, onde foi instalado um tubo coletor, denominado “*inlet*” e um sensor de temperatura, umidade relativa e GPS (*Global Positioning System*) para registrar o posicionamento de cada coleta.

Para que não houvesse influência da emissão do avião na amostragem, o tubo coletor e o sensor foram instalados na janela da cabine do piloto (FIG.22) ou na asa, dependendo do modelo do avião.

As amostragens foram realizadas entre 12:00 e 14:00 horas, horário local, período de estabilidade maior dentro da troposfera, e portanto com maior repetibilidade de condição atmosférica, onde a altura da camada limite está próximo de sua altura máxima.

Figura 22: Tubo coletor instalado no avião para a coleta de ar. A) avião bimotor com coleta na janela e B) avião monomotor com coleta na asa.

O tubo coletor era conectado na unidade compressora que transfere o ar para a mala contendo os frascos e nesta foi conectado um dispositivo, denominado display do piloto, que indica a altitude previamente programada em que o piloto deve fazer a amostragem do primeiro até o último frasco. Ao iniciar o processo de amostragem, primeiramente, foram passados 5L de ar pelo tubo que une os frascos,

denominado “*manifold*”, com a finalidade de condicioná-lo com as condições ambientes. Em seguida, as válvulas dianteira e traseira do frasco foram abertas e 10L de ar foram passados no frasco para condicioná-lo com a umidade e composição do ar local. Em seguida, a válvula traseira foi fechada e o ar foi comprimido até 40psi quando então a válvula dianteira foi fechada.

A trajetória do avião (FIG.23) foi realizada em formato helicoidal descendente com diâmetro em torno de 5km, para não haver influência do gás emitido pelo motor do avião na coleta, iniciando em 4420m e finalizando em 427m em ALF, 308m em RBA, SAN e TAB.

Figura 23: Esquema da trajetória em formato helicoidal descendente realizada pelo avião de pequeno porte durante a amostragem de ar.

O processo de amostragem semiautomático foi previamente programado, conforme mostra a TAB.5, onde encontram-se os planos de voo para RBA, TAB e ALF e o para os voos realizados em SAN, os planos utilizados entre 2000 e 2010 estão apresentados na TAB.6.

Tabela 5: Plano de voo utilizado em ALF, RBA e TAB.

Frasco	Plano de voo (em metros)		
	Locais		
	RBA	TAB	ALF
1	4420	4420	4420
2	3658	3658	3962
3	3200	3200	3505
4	2743	2743	3048
5	2438	2438	2591
6	2134	2134	2134
7	1829	1829	1829
8	1524	1524	1524
9	1219	1219	1219
10	914	914	914
11	610	610	610
12	305	305	457

Tabela 6: Plano de voo utilizado em SAN.

Frasco	Plano de voo SAN (em metros)		
	Período		
	2000 a 2005	2006 a 2010	a partir 07/2010
1	3658	4267	4420
2	3200	3962	4115
3	2743	3658	3810
4	2286	3353	3505
5	1829	3048	3200
6	1524	2743	2896
7	1219	2438	2591
8	914	2134	2286
9	610	1829	1981
10	305	1524	1676
11		1219	1372
12		1067	1067
13		914	914
14		762	762
15		610	610
16		457	457
17		305	305

Inicialmente as amostragens em SAN foram realizadas sobre dois locais:

a) sobre a Torre de Fluxo de CO₂, situada a 7km da Rodovia BR-163, na altura do Km 67 (02°51'S, 54°58'O) e b) 30 km deste local na direção leste, sobre uma área de pastagem. Esta estratégia inicial foi feita para verificar a influência desta atividade na superfície no fluxo calculado. Este estudo mostrou que a diferença não era significativa, passando o voo então, a partir de 2006, a ser realizado em sua totalidade sobre a torre de fluxo de CO₂. O resultado deste estudo está apresentado

na dissertação de D'Amélio (2006). Em 2010, uma nova alteração foi feita no sentido de aumentar a altitude máxima do voo para 14500 pés (4420m), para igualar com os novos locais (RBA, TAB e ALF) iniciados neste ano. As demais altitudes foram organizadas de 1000 em 1000 pés (305m).

4.2 Descrição dos Equipamentos e Análise

Em 2003 foi construída uma réplica do sistema para análise dos gases CO_2 , CH_4 , CO , N_2O , H_2 e SF_6 (FIG.24), denominado MAGICC (*Multiple Analysis of Gases Influence Climate Change*), desenvolvido pelo ESRL/NOAA e pela Dra. Luciana Vanni Gatti, sob supervisão de pesquisadores deste instituto, e esta réplica foi instalada no IPEN em 2004, quando passou a realizar todas as análises de GEE. Este sistema é totalmente automático e os resultados de CH_4 e CO são fornecidos em concentração de gás em ppb (partes por bilhão) e os de SF_6 em ppt (partes por trilhão).

Figura 24: Sistema MAGICC 3/Brasil – Sistema de análise de GEE no LQA/IPEN. 1- Monitor LI-COR (CO_2); 2 - Monitor de CO/H_2 Peak Laboratories (CO/H_2); 3 - Cromatógrafo gasoso HP ($\text{N}_2\text{O}/\text{SF}_6/\text{CH}_4$); 4 - Controlador de fluxo dos gases; 5 - Válvula “Sample select e System select”; 6 - sample/ CO reference; 7 - Medidor de vácuo e Receptor de amostras; 8 - Interface do cromatógrafo; 9 - Banho resfriador; 10 - Microcomputador; 11 - Monitor, 12 - Interface do monitor de CO_2 , 13 - Interfaces das válvulas e do monitor CO/H_2 .

A quantificação do CH_4 é realizada utilizando-se um cromatógrafo gasoso, da marca HP (Hewlett Packard), modelo HP 6890 series Plus com detector de ionização de chama (FID), com pré-coluna de 198cm de comprimento e 3/16” de

diâmetro externo e empacotada com Sílica Gel 60/80 mesh e uma coluna de 106cm de comprimento e 3/16" de diâmetro externo e empacotada com Peneira Molecular 5A 60/80 mesh. O sistema utiliza uma válvula de 10 vias com duas posições (Valco) e um *loop* de 12mL para a injeção da amostra e a separação de compostos indesejados, conforme mostra a FIG.25.

Figura 25: Esquema de funcionamento nas posições de carregamento da amostra “LOAD” (a) e injeção na coluna “INJECT” (b).

Quando a válvula de 10 vias está na posição “load” a amostra passa pelo “loop” por 3 minutos para a descontaminação da amostra anterior, e apenas o gás carreador Nitrogênio 6.0 (gás de arraste) está passando pela pré-coluna e pela coluna a uma temperatura de 70°C e com um fluxo de 95mL.min⁻¹. Ao mudar para posição “inject” a amostra contida no “loop” é transferida para a pré-coluna com o auxílio do gás de arraste. No momento em que o gás amostrado atinge a coluna, a válvula de 10 vias volta para a posição “load” para apenas o CH₄ chegar até o detector e então é iniciada a limpeza da pré-coluna, através da passagem do gás de arraste na mesma, em sentido oposto. A chama do detector FID é feita com o comburente H₂ com fluxo de 45mL.min⁻¹ e pelo oxidante de composição especial (60% N₂ e 40% O₂) com fluxo de 250mL.min⁻¹.

O sistema de análise do SF₆ está montado no mesmo cromatógrafo que analisa o CH₄ e com o mesmo princípio de separação e injeção de amostra. A pré-coluna e a coluna são idênticas de Haysep Q 100/120 mesh, com 183cm de comprimento e 3/16" de diâmetro externo. O “loop” utilizado foi de 15mL de volume e a temperatura do forno a 70°C. Neste caso o gás de arraste é uma mistura de argônio e 5% metano (90mL.min⁻¹, Padrão Primário). O detector ECD (Detector de

Captura Eletrônica) utiliza uma fonte de Níquel 63 (^{63}Ni), a qual ioniza as moléculas, e são formados elétrons lentos. Estes elétrons migram para o anodo (célula voltaica), os quais produzem uma corrente padrão. Quando a amostra ionizada entra no detector, a corrente é reduzida, e esta diferença é proporcional a quantidade de composto.

O instrumento que analisa o CO é o monitor da Peak Laboratories CO/H₂. Este sistema é capaz de detectar baixas concentrações em ppb. Existe um filtro com combustor catalítico que oxida o CO presente no gás de arraste (Ar sintético) para CO₂. O gás a ser amostrado é inserido no equipamento através do “loop” pelo mesmo procedimento descrito anteriormente. O gás de arraste (20mL.min⁻¹) carrega a amostra para um sistema de pré-coluna e coluna de 1/8” de diâmetro externo situadas dentro de um forno, a 100°C. Desta coluna, o gás passa por um leito aquecido (265°C) de óxido de mercúrio (HgO), e o gás CO contido na amostra reage com o óxido de mercúrio, liberando vapor de mercúrio metálico que é quantificado pela absorção de luz ultravioleta na banda de 254nm, que atravessa a câmara de leitura. Pela diferença entre a radiação emitida e a que chega ao fotômetro, após entrar em contato com a amostra, tem-se um sinal proporcional à concentração de CO contido na amostra.

4.3 Precisão dos Resultados

A precisão dos resultados deve-se ao método de quantificação da amostra, que compara as amostras analisadas com gás de referência produzidos pela NOAA. A cada amostra analisada dos gases CH₄, SF₆ e CO, é analisado o gás de referência antes e depois da análise da amostra e para a quantificação é utilizada a média de ambas as referências (FIG.26). A sequência dos gases no cálculo pode ser representada da seguinte maneira: (referência – amostra – referência...). É calculada uma fração da resposta da amostra pela razão das referências, esta fração é utilizada na curva de calibração, sendo que a curva também é construída pela razão dos vários pontos de concentração e do gás referência, normalizando assim alterações que a variação de temperatura e pressão acarretariam a resposta do detector. Na FIG.26 (direita) pode-se observar este efeito de compensação de alteração de resposta do detector, pois ambos, amostra e referência, variam e assim a alteração é normalizada. Este é o motivo da alta precisão deste sistema analítico.

Figura 26: Calibração do gás CH₄ de cilindro de intercomparação da WMO (azul) com 30 análises ($1820,59 \pm 2.15$ ppb) e o gás referência (vermelho).

Os gases CH₄ e SF₆ possuem relação linear da concentração com a área, para as concentrações estudadas, sendo também valores bastante estáveis. Os padrões utilizados são muito próximos da faixa de concentração medida e assim o outro ponto da curva é o zero. Assim, apenas um gás de referência é necessário para o cálculo da concentração desses. Como o gás CO não possui relação linear da concentração com a área, sua curva de calibração é construída com 7 padrões (0 a 300ppb). Estudos do GMD/ESRL/NOAA (*Global Monitoring Division/Earth System Research Laboratory/National Oceanic Atmospheric Administration*) recomendam calibração para o CO a cada 15 dias. Os padrões utilizados na construção destas curvas foram calibrados no laboratório de calibração do GMD/ESRL/NOAA.

4.4 Estabilidade do Sistema Analítico

A estabilidade do sistema é monitorada realizando calibração de dois cilindros reservados para tal fim, denominados “target tank”, que são constituídos de ar comprimido calibrado na NOAA. São realizadas calibrações destes cilindros a cada mês, e cada calibração é feita de 20 medidas. Estas são analisadas segundo a variabilidade que demonstram dentro das vinte medidas e também seu valor absoluto indicam a condição do sistema analítico. Na FIG.27 observa-se as calibrações desde 2007, com concentração média de $1822,10 \pm 0,77$ ppb.

Figura 27: Calibrações dos cilindros de CH₄ a partir de 2007, (linha preta) a concentração média; (linha vermelha) desvio padrão das medidas; (azul) as concentrações.

4.5 Limpeza e Preparação das Malas de Amostragem

Após a análise, a primeira etapa de preparação da mala de amostragem é a secagem dos frascos, para remover o excesso de umidade adquirida durante a coleta. Na secagem é utilizado ar ultra seco produzido por um sistema de secagem de ar. Cada frasco é submetido à passagem do ar ultra seco por 30 minutos com fluxo entre 35 e 40 L.min⁻¹.

Após a secagem dos frascos, é feito o condicionamento dos mesmos utilizando um padrão de gás carbônico com concentração em torno de 350 ppm. O condicionamento é realizado para que o ar contido dentro dos frascos esteja numa concentração menor que a encontrada no ambiente coletado, evitando contaminações na amostra. Realizados a limpeza e o condicionamento dos frascos de amostragem, é feita a programação da mala de amostragem nas condições do plano de voo apresentado nas TAB.5 e 6. Nesta programação são informados o volume para condicionamento na amostragem, as pressões de condicionamento e de coleta para cada frasco, as altitudes a serem coletadas, bem como informações adicionais, tais como locais de amostragem e identificação da mala. Estes dois últimos ficam armazenados na memória, sendo necessária sua programação apenas em caso de perda de memória da mala.

4.6 Cálculo do Fluxo de CH₄ por meio do Método de Integração de Coluna

Descrito primeiramente por Chou et al. (2002), o Método de Integração de Coluna utilizado para o cálculo de fluxo, foi aprimorado por Miller et al. (2007), subtraindo das concentrações obtidas em cada local de amostragem a concentração de entrada no continente, para determinar a real contribuição no fluxo de CH₄ da Floresta Amazônica. Esta técnica também foi utilizada em D'Amelio et al. (2009) e Gatti et al. (2010). Neste método é realizada a integração do perfil, após a subtração da concentração do ar de entrada no continente, considerando o tempo desta trajetória até o local do perfil (MILLER et al., 2007).

Para o cálculo da concentração de entrada no continente, foi utilizado o gás SF₆, como traçador de massas de ar. Este gás foi escolhido por não haver fonte de emissão deste ao longo de toda a área entre a costa e os locais estudados (OLIVIER et al., 1999) (FIG.28). Portanto a concentração de SF₆ obtida no perfil amostrado é considerada a mesma que entrou no continente. Estas concentrações são relacionadas com as duas Estações de Monitoramento Global localizadas no Oceano Atlântico Sul (Ilha de Ascension - ASC) e Norte (Ilha de Barbados - RPB) e assim calcula-se a fração do ar de entrada no continente (MILLER et al., 2007; D'AMELIO et al., 2009; GATTI et al., 2010).

Figura 28: Simulação da emissão de SF₆ no planeta. A marcação em rosa destaca a área de estudo, a qual não possui emissão deste gás (OLIVIER et al., 1999).

A FIG.29 mostra as concentrações de SF₆ dos perfis verticais realizados, utilizadas para calcular a concentração de entrada do ar no continente, para os quatro locais de amostragem, ALF, RBA e TAB para o ano de 2010 e SAN entre

2000 e 2010. Observa-se que a maioria das concentrações dos perfis verticais está entre as concentrações das duas estações de monitoramento global da NOAA, ASC e RPB, concordando com as trajetórias retrocedentes, e acompanham o aumento global de SF_6 .

Figura 29: Concentrações médias dos perfis verticais de SF_6 (ppt), em SAN (2000-2010) e em ALF, RBA e TAB (2010), e as concentrações em ASC e RPB.

A fração de composição do ar de entrada no continente (BKG do termo em inglês *background*) é uma fração relativa às estações de ASC e RPB, sendo calculada segundo a EQ. 4.1 e, a concentração BKG (X_{bkg}) é calculada segundo a EQ. 4.2.

$$ASC_{local} = 1 - RPB_{local} = \frac{SF_{6_{local}} - SF_{6_{RPB}}}{SF_{6_{ASC}} - SF_{6_{RPB}}} \quad (4.1)$$

$$X_{bkg} = ASC_{local} X_{ASC} + RPB_{local} X_{RPB} \quad (4.2)$$

Onde ASC_{local} e RPB_{local} são as frações correspondentes de cada estação de ASC e RPB, respectivamente. $SF_{6_{local}}$, $SF_{6_{RPB}}$ e $SF_{6_{ASC}}$ são as concentrações de SF_6 nos locais estudados e, em RPB e ASC, respectivamente. X_{bkg} é a concentração BKG de cada gás, e X_{ASC} e X_{RPB} , as concentrações do gás de interesse, neste caso o CH_4 , em ASC e RPB, respectivamente.

O fluxo de CH_4 foi calculado baseado na integração da diferença das concentrações (da costa ao local amostrado) da superfície ao topo do perfil dividido pelo tempo gasto entre a costa e o local de estudo, para cada altura com coleta de frasco, de acordo com a EQ. (4.3) (MILLER et al., 2007; D'AMELIO et al., 2009; GATTI et al., 2010). Este cálculo foi realizado para cada perfil. Portanto, este fluxo representa a contribuição da emissão de CH_4 pela área da Bacia Amazônica representada pelas trajetórias das massas de ar entre a costa e cada local amostrado (ALF, RBA, SAN e TAB).

$$F_{CH_4} = \frac{\int_{z_i}^{z_f} [(X_{CH_4})_{LOCAL} - (X_{CH_4})_{bkg}] dz}{t} \quad (4.3)$$

Onde X_{CH_4} é a concentração de CH_4 na unidade $mol.m^{-3}$, a qual foi determinada pela concentração nos perfis verticais observados, pela temperatura e pressão de acordo com as altitudes de amostragem. z_i e z_f são as altitudes mínima e máxima da integração vertical que é definida pelas altitudes do menor (300m) e maior nível dos perfis (4420m), sendo a integração realizada a cada dois pontos subsequentes. Para minimizar o erro se considera a concentração do primeiro frasco como sendo a mesma da superfície e é realizada a integração entre a superfície

(152m: SAN; 175m: RBA; 188m: TAB e 250m: ALF) primeiro ponto de coleta. t é o tempo gasto pela massa de ar, em dias, entre a costa e o local amostrado.

A FIG.30(a) apresenta um exemplo de perfil amostrado no dia 25/03/2009 sobre SAN e a linha vertical representa o valor da concentração BKG para este perfil. Enquanto que a FIG.30(b) representa o perfil subtraído à concentração BKG. Nota-se que a subtração da concentração BKG não altera o comportamento do perfil, apenas mostra o resultado das atividades de emissão da Bacia.

Figura 30: (a) exemplo de um perfil amostrado no dia 25/03/2009 sobre SAN. A linha azul representa a concentração BKG para este perfil. (b) perfil normalizado do dia 25/03/2009 utilizado para a integração no cálculo de fluxo.

A FIG.31 mostra o modelo de caixa simplificado do cálculo de fluxo pelo Método de Integração de Coluna, onde o topo da caixa é a altura máxima do perfil vertical e a base é representada pela área onde a massa de ar se desloca entre a costa e o local de estudo, que neste caso é SAN.

Miller et al. (2007) utilizaram o valor médio de 2 dias para t (tempo) para o cálculo do fluxo. Entretanto, D'Amelio et al. (2009) e Gatti et al. (2010) introduziram uma melhoria neste método calculando as trajetórias das massas de ar a cada 500m no perfil vertical, entre as altitudes de 500m a 4500m, para todos os voos realizados, pelo modelo simulador de massas de ar HYSPLIT (DRAXLER & ROLPH, 2011, http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT_traj.php), e as altitudes dos voos foram relacionadas à altitude mais próxima simulada. Assim foi calculado o tempo, que cada parcela de massa de ar no perfil, levou da costa até o local estudado, sendo

possível observar que a origem das massas de ar varia com a altitude. Na FIG.32 observam-se dois exemplos das trajetórias retrocedentes entre a costa brasileira e SAN, para o dia 14/01/2010 e 22/10/2010. O tempo para o cálculo do fluxo foi contado para cada perfil em cada trajetória calculada (FIG.32). Quando a trajetória atingiu valores inferiores a 50m de altitude antes de chegar à costa, foi utilizado o tempo médio das outras altitudes calculadas para este mesmo perfil vertical.

Figura 31: Representação do modelo de caixa simplificado utilizado para o cálculo de fluxo pelo Método de Integração de Coluna.

Figura 32: Exemplos de trajetórias retrocedentes da massa de ar entre SAN e a costa brasileira, para o dia 14/01/2010 e 22/10/2010, utilizando o modelo HYSPLIT.

4.7 Estimativa da Emissão de CH₄ por meio da Queima de Biomassa

A observação da emissão natural de CH₄ para a atmosfera é uma informação muito relevante, assim como a diferença entre a emissão durante a estação chuvosa e a seca. Na primeira têm-se fontes de emissão oriunda de processos anaeróbicos, enquanto que na segunda, espera-se que a emissão pela queima de biomassa seja bastante significativa. Para separar as emissões biogênicas da emissão pela queima da biomassa utilizou-se o monóxido de carbono (CO) como traçador de queima de biomassa. Enquanto o CH₄ apresenta aproximadamente 2% de aumento quando se compara a transição com a estação seca, o CO apresenta de 2 a 4 vezes de aumento. Por esta razão é um excelente traçador de queima de biomassa.

Para estimar esta razão foi utilizado o CO observado nos perfis, foram selecionados apenas os perfis de estação seca para o qual a pluma da queima de biomassa foi claramente identificável no perfil, encontraram-se 19 perfis que se adequam a estes critérios (FIG.33). A razão CO/CH₄ encontrada foi de $6,4 \pm 1,5 \text{ ppbCO/ppbCH}_4$. Para efeito de comparação Yokelson et al. (2007), por meio de medidas com avião na estação seca de 2004 na Amazônia, estimaram uma razão de $10,3 \text{ ppbCO/ppbCH}_4$, e Yokelson et al. (2008) estimaram uma razão para queima de biomassa na Amazônia de $9,9 \text{ ppbCO/ppbCH}_4$ (este estudo inclui medidas realizadas com aviões, medidas de superfície e em laboratório) e Andreae e Merlet (2001) publicaram uma taxa de emissão para as florestas tropicais de $8,7 \text{ ppbCO/ppbCH}_4$. Embora esta estimativa esteja próxima da estimativa deste estudo, pode haver razões pelas quais os valores são diferentes. Uma possibilidade é que a área de representatividade dos locais de estudo, baseada nas trajetórias das massas de ar, não incluem apenas a floresta tropical, mas também florestas degradadas, savanas, pastagens e áreas com atividades antrópicas. Além disso, a oxidação de CO por OH também pode explicar esta discrepância, porque o CO produzido nas queimadas decai. Durante a estação seca tropical, a concentração de OH pode ser tão alta quanto $2,8 \times 10^6 \text{ molécula.cm}^{-3}$ (SPIVAKOVSKY et al., 2000) implicando um tempo de vida do CO de aproximadamente 20 dias (DEMORE et al., 1997). Assumindo um tempo de trânsito das massas de ar de dois dias (para SAN) e seis dias (para ALF, RBA e TAB) a partir da região da queima, implica uma redução da razão de emissão real de 20%. A razão CO/CH₄ calculada neste estudo é

apropriada, pois foi utilizada para estimar os fluxos e a influência da emissão de CH₄ por queima de biomassa. Além disso, utilizando uma razão de emissão de 8,7ppbCO/ppbCH₄ ao invés de 6,4ppbCO/ppbCH₄ tem-se apenas um pequeno impacto nos resultados, aumentando a emissão biogênica na estação seca, mas não modifica sensivelmente a sazonalidade.

Figura 33: Exemplos de perfis verticais, durante a estação seca, escolhidos para calcular a razão CO/CH₄.

Para remover corretamente o fluxo de queima de biomassa a partir do fluxo total de CH₄, foi necessário também considerar que pode haver um fluxo natural de CO dos solos (CONRAD e SEILER, 1985) e como um subproduto das emissões de isopreno de árvores (KUHN et al., 2007). A fim de estimar o fluxo de CO biogênico utilizou-se a observação de que o fluxo de CO calculado para SAN e para ALF, entre março e julho é aproximadamente constante, de 21,7mgCO.m⁻².dia⁻¹ e de 11,1mgCO.m⁻².dia⁻¹, respectivamente, e para RBA e TAB, entre março e junho, de 13,5 e 11,7mgCO.m⁻².dia⁻¹, respectivamente (FIG.34), embora seja provável que na estação seca as emissões biogênicas de CO são maiores do que na estação chuvosa, devido às emissões de isopreno e ao aumento do OH (SPIVAKOVSKY et al., 2000). No entanto, por simplicidade, assumiu-se que o período estável de emissões de CO biogênico persiste ao longo do ano, o que permite calcular o fluxo de emissão biogênica do fluxo total de CH₄ como:

$$F_{CH_4}^{BIO} = F_{CH_4} - r_{CH_4:CO}^{bb} (F_{CO} - F_{CO}^{bio}) \quad (4.4)$$

Figura 34: Fluxos de CO para todos os perfis de SAN (2000-2010), ALF, RBA e TAB (2010). A linha representa a média para a estação chuvosa do período que se considerou representativa das emissões biogênicas ao longo do ano.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Estudo das Trajetórias das Massas de Ar

Foram calculadas as trajetórias das massas de ar pelo programa HYSPLIT (DRAXLER & ROLPH, 2011, http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT_traj.php, acesso em: 20 janeiro de 2011), para cada 500m de altitude, entre 500 e 4500m, para todos os voos realizados sobre ALF, RBA, SAN e TAB. As trajetórias retrocedentes foram iniciadas a partir do dia e hora da coleta, e foram calculadas para sete dias anteriores à amostragem (FIG.35). Nota-se que as massas de ar realizam um trajeto diferente para cada local e altitude e o perfil encontrado corresponde a todas as interações realizadas pela massa de ar desde a costa brasileira até o local de amostragem. A FIG.36 apresenta as trajetórias retrocedentes de SAN para o período entre 2000 e 2010 e na FIG.35 as trajetórias retrocedentes para os quatro locais de amostragem para o ano de 2010, observa-se que as massas de ar, que chegam aos quatro locais de estudo, entram no continente predominantemente pela costa nordeste brasileira.

Figura 35: Trajetórias retrocedentes simuladas pelo modelo HYSPLIT (a) Tabatinga, (b) Santarém, (c) Rio Branco e (d) Alta Floresta; (vermelho) 500m, (verde) 2000m e (branco) 4000m.

A partir deste estudo foi possível determinar a área de representatividade de cada local de estudo (FIG.37), que corresponde ao caminho realizado pelas

massas de ar desde a costa até cada local de estudo. Como pode ser observado, os locais que melhor representam toda a Bacia Amazônica são RBA e TAB, pois as massas de ar que chegam a estes locais abrangem a maioria da área da Bacia Amazônica. As medidas realizadas neste estudo até 4,4km de altitude demonstram o fluxo de uma grande área, pois representam todos os processos que ocorrem em toda a área por onde a massa de ar translada entre a costa brasileira e o local de amostragem, como observado na FIG.37.

Figura 36: Imagem das trajetórias retrocedentes simuladas pelo modelo HYSPLIT para SAN, para o período entre 2000 e 2010, (vermelho) 500m, (azul) 2000m e (branco) 4000m.

Figura 37: Imagem do Brasil destacando a área de representatividade de cada um dos quatro locais de estudo, ALF, RBA, SAN e TAB.

5.2 Fluxo de CH₄ entre a Costa Brasileira e SAN

Foram realizados 124 perfis verticais entre dezembro de 2000 e dezembro de 2010 sobre SAN, apresentados na FIG.38. Por meio desta figura é possível verificar o comportamento médio dos perfis, isto é, se eles indicam emissão ou absorção pela Bacia Amazônica. Observa-se a indicação de emissão para os três períodos apresentados na FIG.38 sobre SAN, uma vez que a concentração aumenta em função de sua proximidade com a superfície, indicando que esta região funciona como fonte de CH₄.

Figura 38: Perfis verticais amostrados sobre SAN entre 2000 e 2010, (azul escuro) perfis realizados entre janeiro e março; (azul claro) perfis realizados entre abril e julho e; (vermelho) perfis realizados entre agosto e dezembro.

A concentração observada nos perfis corresponde à resultante da concentração de entrada no continente acrescida da contribuição da Bacia Amazônica. Sendo que, de maneira geral, observa-se que o topo do perfil representa a concentração de entrada no continente e o aumento observado próximo da superfície a emissão oriunda da Bacia Amazônica. A FIG.39 apresenta a concentração média de cada perfil vertical acima e abaixo da camada limite planetária (CLP) realizado em SAN entre 2000 e 2010, juntamente com as concentrações das estações de monitoramento global da NOAA de ASC e RPB. A altura aproximada da CLP foi obtida baseando-se no perfil de temperatura e umidade relativa medidos simultaneamente nos perfis realizados. A CLP observada

ocorre na maior parte na faixa de altitude entre 1000m e 1200m, eventualmente pode ocorrer acima disto, como no exemplo da FIG.40d. Acima da CLP as concentrações encontradas apresentam de maneira geral um comportamento homogêneo e abaixo desta faixa uma variabilidade devido às atividades na superfície. As concentrações abaixo da CLP, em geral, são maiores que as concentrações acima da CLP, indicando uma maior contribuição de emissão da Bacia. Este resultado é semelhante ao comportamento dos perfis verticais realizados conforme observado na FIG.38.

Figura 39: Série temporal de CH_4 para a média dos perfis verticais realizados, acima (azul) e abaixo (vermelho) da camada limite planetária, e as concentrações das duas estações de monitoramento global, Ascension (laranja) e Barbados (roxo) para este mesmo período.

Observa-se também, analisando a FIG.39, nas médias acima da CLP (pontos em azul), um aumento nas concentrações determinadas em SAN a partir do ano de 2007. Este aumento acima da CLP significa um aumento na concentração global e isto realmente foi observado na concentração global de CH_4 , conforme publicado por Dlugokencky et al. (2009). Este aumento também pode ser observado nas FIG.39 e 41 nas estações de monitoramento global de ASC e RPB (linhas laranja e roxa, respectivamente). Nos resultados dentro da Bacia Amazônica, isto é, nos resultados abaixo da CLP (pontos vermelhos) não fica claro se houve este aumento observado. Segundo Dlugokencky et al. (2009), a concentração de CH_4 na atmosfera voltou a aumentar neste período e as razões prováveis são: uma emissão

média maior em áreas alagadas nas altas latitudes do Hemisfério Norte durante o ano de 2007, devido a temperaturas excepcionalmente quentes e emissões tropicais durante 2007 e 2008, relacionadas a um aumento da precipitação em áreas alagadas durante um episódio de La Niña. Estas possibilidades serão analisadas adiante na parte da análise de fluxo.

Figura 40: Exemplos de perfis de temperatura e umidade relativa medidos simultaneamente nos perfis verticais em SAN.

Para determinar a contribuição da Bacia, como fonte ou sumidouro de CH_4 , foi removida a concentração de entrada no continente (concentração BKG). A concentração BKG de CH_4 obtida para cada perfil está apresentada na FIG.41, juntamente com as concentrações das duas estações de Monitoramento Global, ASC e RPB, que são utilizadas no cálculo da fração para determinar a concentração

BKG. Observando-se a FIG.41, as concentrações BKG calculadas para SAN estão compreendidas entre as duas estações de monitoramento global, ASC e RPB, indicando que o ar que entra no continente recebe contribuição tanto do ar que vem mais do sul como do norte, concordando com as trajetórias retrocedentes das massas de ar que entram pela costa nordeste brasileira. Observa-se ainda que em alguns períodos o ar que chega a SAN recebe uma maior contribuição do Hemisfério Sul e em outros momentos do Hemisfério Norte (FIG.36).

Figura 41: Série temporal da concentração BKG de CH₄ para SAN e nas estações de monitoramento global de ASC e RPB.

Após remover a concentração BKG, foram calculados todos os fluxos de CH₄ para cada perfil pelo Método de Integração de Coluna (FIG.42), no período de 2000 a 2010. Foram ainda calculadas as médias mensais. Em dois períodos do ano observaram-se fluxos maiores: de janeiro a março, e de agosto a dezembro. A região de SAN apresentou um fluxo médio anual de CH₄ de $53,0 \pm 27,9 \text{ mgCH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ mostrando uma alta emissão e sua sazonalidade durante o ano na região leste da Bacia Amazônica. Observando-se esta sazonalidade, nota-se um fluxo de emissão de $79,6 \pm 49,2 \text{ mgCH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ entre janeiro e março, durante a fase mais intensa de chuvas no ano, demonstrando uma alta emissão natural de CH₄ para este período. Entre os meses de abril e julho observa-se uma diminuição desta emissão, com um fluxo médio de $31,6 \pm 18,0 \text{ mgCH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$. Para o período entre agosto e

dezembro, o fluxo médio de CH_4 foi de $54,3 \pm 23,1 \text{ mgCH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$, mostrando um novo aumento do fluxo devido a somatória da emissão natural e da emissão devido a queima de biomassa para este período do ano.

Figura 42: Fluxo de CH_4 ($\text{mgCH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$) para a região entre a costa brasileira e SAN, entre os anos de 2000 e 2010 em azul o fluxo médio mensal e em rosa o fluxo obtido em cada perfil vertical realizado.

Miller et al. (2007) encontrou um fluxo médio anual para esta região de $35 \text{ mgCH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ entre o período de 2000 a 2006, no entanto até este período, este projeto teve uma limitação na distribuição dos voos ao longo do ano, devido ao fato de até 2004 as análises terem sido realizadas nos EUA. As únicas estações secas observadas foram em 2004 e 2006. Considerando-se que a estação seca teve uma representatividade menor, isto pode justificar a diferença de valor médio anual encontrado nos dois estudos. A partir de 2007 a concentração de CH_4 voltou a aumentar, conforme observado nas concentrações acima da CLP e nas concentrações BKG (FIG.39 e 41) e na concentração global de CH_4 (Dlugokencky et al., 2009). Além disto, no cálculo de fluxo foi utilizado o tempo médio de 2 dias de trajetória, enquanto neste estudo foi calculado o tempo que a massa de ar percorreu entre a costa e SAN para cada altitude amostrada pelo modelo HYSPLIT.

Para verificar se o uso do tempo de trajetória médio de 2 dias influenciaria o valor médio do fluxo, foi realizado um estudo substituindo o valor da trajetória retrocedente calculada pelo HYSPLIT pelo tempo médio de 2 dias, como utilizado

por Miller et al. (2007). O fluxo de CH_4 obtido para este teste entre 2000 e 2010 (124 voos) apresentou um fluxo médio de $42\text{mgCH}_4\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$, o que representa um fluxo 20% maior ao observado por Miller et al. (2007) para o período de 2000 a 2006 (44 voos), devido ao acréscimo de 4 anos de medidas (80 voos) com uma periodicidade maior, uma distribuição mais homogênea e ao aumento da concentração global de CH_4 também observado nas concentrações acima da CLP e nas concentrações BKG (FIG.39 e 41). Considerando-se as incertezas em cada etapa da metodologia, podemos afirmar que o tempo de trajetória é o principal motivo de termos encontrado um valor maior neste estudo. Portanto, considerando o valor de fluxo calculado neste estudo, de $53,0 \pm 27,9\text{mgCH}_4\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$, isto é, 26% maior, concluímos que o cálculo da trajetória das massas de ar é uma etapa importante da determinação do fluxo.

Na FIG.43 verifica-se que o fluxo com o tempo igual a 2 dias apresenta a mesma sazonalidade que o fluxo com o tempo calculado para cada perfil vertical, porém Miller et al. (2007) não observou sazonalidade no fluxo encontrado devido a limitação na distribuição dos voos ao longo do ano. Este resultado demonstra uma maior representatividade a partir do momento em que ampliamos a base de dados e a série temporal, pois a partir do ano de 2007 os voos passaram a ser realizados com maior frequência, aumentando o número de amostragens.

Figura 43: Fluxo de CH_4 ($\text{mgCH}_4\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$), calculado com o tempo igual a 2 dias, para a região entre a costa brasileira e SAN entre os anos de 2000 e 2010, em azul o fluxo médio mensal e em rosa o fluxo obtido em cada perfil vertical realizado.

Para melhorar o entendimento da sazonalidade do fluxo de CH_4 observada durante o ano foi calculada a precipitação média por satélite (HyDIS, <http://hydis8.eng.uci.edu/hydis-unesco/>) desta região e o número de focos de queimadas (Banco de dados de queimadas do CPTEC/INPE, <http://www.dpi.inpe.br/proarco/bdqueimadas/>) para o período estudado. Para calcular a precipitação por satélite e os focos de queimada dividiu-se esta região em quatro quadrantes (TAB.7).

Tabela 7: Delimitação dos quadrantes da região entre a costa e SAN.

Quadrantes	Quadrante 1	Quadrante 2	Quadrante 3	Quadrante 4
Latitude superior	2°N	4°S	6°S	8°S
Longitudes	55°O - 32°O	50°O - 32°O	45°O - 32°O	40°O - 32°O
Latitude inferior	4°S	6°S	8°S	10°S

A FIG.44 apresenta a média mensal da pluviometria por satélite da região entre a costa brasileira e SAN, para os anos de 2001 a 2010. Seguindo o critério de classificar como estação seca pluviometria abaixo de 100mm (ARAGÃO et al., 2008), classificou-se a estação chuvosa entre os meses de janeiro e maio e como estação seca entre os meses de junho a dezembro. A média pluviométrica dos anos estudados foi de 1262mm com faixa de variabilidade de 133mm.

Figura 44: Pluviometria mensal da região entre a costa brasileira e SAN, entre os anos de 2001 e 2010 (Fonte: HyDIS, <http://hydis8.eng.uci.edu/hydis-unesco/>).

Os focos de queimada para esta mesma região são apresentados na FIG.45. Observa-se que no início da estação seca o número de focos de queimada para esta região aumenta significativamente, atingindo em outubro e novembro o maior número de focos.

Figura 45: Focos de queimadas da região entre a costa brasileira e SAN, entre os anos de 2000 e 2010 (Fonte: <http://www.dpi.inpe.br/proarco/bdqueimadas/>).

Analisando os índices pluviométricos desta região, observa-se que os anos de 2005 e 2010 foram anos de seca. Segundo Lewis et al. (2011) no ano de 2010 ocorreu na Bacia Amazônica uma seca mais severa do que a do ano de 2005. No estudo da área demarcada pelas trajetórias para SAN, foi observado no ano de 2005 uma pluviometria acumulada de 1156mm, enquanto que em 2010 de 1018mm. A FIG.46 mostra uma comparação da precipitação por satélite (HyDIS), para a região entre a costa e SAN, do acumulado no ano de 2010 em relação a média do período entre 2001 a 2009 (1298mm). Observa-se que a redução de precipitação ocorreu nos meses de maior intensidade das chuvas, isto é, entre janeiro a março, onde o volume total no ano de 2010 (soma de janeiro a março: 278mm) foi muito inferior à média entre 2001 e 2009 (634mm), enquanto na estação seca (junho a dezembro) de 2010 (soma de junho a dezembro: 349mm) ocorreu um volume maior do que o observado na média entre 2001 a 2009 (247mm).

Comparando-se o fluxo médio mensal de CH_4 obtido no ano de 2010 com o fluxo médio mensal obtido entre os anos de 2000 e 2009 (FIG.46), observa-se que nos meses de janeiro a março, em que o volume de chuvas foi menor do que a média, o fluxo de CH_4 no ano de 2010 foi próximo do valor médio. E com o aumento no volume das chuvas nos meses de outubro e novembro a emissão de CH_4 por queima de biomassa também diminuiu (FIG.47), como pode ser observado na diminuição do fluxo nestes meses. Estes resultados estão em desacordo com as conclusões de Lewis et al. (2010), que supôs em modelamento, um grande aumento da mortalidade na floresta devido a esta seca. Devido ao fato da menor precipitação ter ocorrido durante a estação chuvosa, pode não ter havido o impacto previsto no referido estudo. Outra observação importante é o fato de que deve ter ocorrido menor área de inundação e isto não impactou a emissão de CH_4 . Isto é um indicativo que deve haver outras fontes importantes na região.

Figura 46: Precipitação por satélite (HyDIS) para a região entre a costa e SAN, (coluna azul) média da precipitação entre os anos de 2001 e 2009 e (coluna vermelha) precipitação para o ano de 2010. E o fluxo médio mensal de CH_4 obtido nesta região no período entre 2000 e 2009 (símbolos azuis) e para o ano de 2010 (símbolos vermelhos).

Segundo Dlugokencky et al. (2009), que observou aumento nas concentrações de CH_4 a partir de 2007, foi apontado como prováveis causas: uma

emissão média maior em áreas alagadas nas altas latitudes do Hemisfério Norte durante o ano de 2007, devido a temperaturas excepcionalmente quentes e emissões tropicais durante 2007 e 2008, relacionadas a um aumento da precipitação em áreas alagadas durante um episódio de La Niña. Neste estudo também foi observado nas concentrações médias acima da CLP, FIG.39 (pontos em azul), e nas concentrações BKG (FIG.41), um aumento do fluxo da região de SAN (FIG.48) a partir do ano de 2007, concordando com o aumento na concentração global de CH_4 a partir do ano de 2007.

Figura 47: Focos de queimadas para a região entre a costa e SAN, (azul) média dos focos entre 2000 e 2009 e (vermelho) número de focos para o ano de 2010.

Figura 48: Série temporal do fluxo de CH_4 para a região entre a costa brasileira e SAN, entre os anos de 2000 e 2010.

5.3 Fluxo de CH₄ da Bacia Amazônica

Além das medidas já realizadas em SAN, a partir de dezembro de 2009 tiveram início medidas de perfis verticais em RBA (21 perfis verticais) e a partir de janeiro de 2010, em ALF (20 perfis verticais) e TAB (20 perfis verticais). Os perfis coletados no ano de 2010 sobre ALF, RBA, SAN e TAB estão apresentados na FIG.49. Sobre as regiões estudadas observa-se indicação de fonte nos perfis realizados sobre todos os locais estudados, sendo que a região que apresentou a maior diferença entre a concentração próxima a superfície, comparada ao topo do perfil foi SAN, seguido de RBA e TAB, enquanto que ALF mostrou a menor variação. Estes resultados mostram que a Bacia Amazônica apresenta diferenças no fluxo de CH₄ para diferentes regiões.

A FIG.50 apresenta a concentração média para cada perfil vertical, no ano de 2010, acima e abaixo da CLP, juntamente com as concentrações das estações de monitoramento global de ASC e RPB. As concentrações abaixo da CLP, em geral, são maiores que as concentrações obtidas acima da CLP, indicando uma maior contribuição de emissão da Bacia. Observa-se na FIG.50 que as concentrações acima (altitudes maiores que 1500m) e abaixo (altitudes menores que 1000m) da CLP de ALF, RBA e TAB são maiores que as concentrações de ASC e RPB, diferentemente do observado em SAN, onde as concentrações acima da CLP, de maneira geral, estão compreendidas entre as concentrações de ASC e RPB. Estes resultados indicam que a região de SAN recebe uma influência regional maior do que as outras regiões, pois a diferença entre as concentrações acima e abaixo da CLP é maior do que a observada nos outros locais.

Para calcular o fluxo de CH₄ primeiramente foi calculada a concentração BKG para cada um dos locais de estudo. As concentrações BKG de CH₄ obtidas para cada perfil realizado, em cada local de estudo, estão apresentadas na FIG.51, juntamente com as concentrações das duas estações de Monitoramento Global, ASC e RPB, que são utilizadas no cálculo da fração para determinar a concentração BKG.

Observando-se na FIG.51 que as concentrações BKG calculadas para ALF, RBA, SAN e TAB estão compreendidas entre as duas estações de monitoramento global, ASC e RPB, indicando que o ar que entra no continente

recebe contribuição tanto do ar que vem do Hemisfério Sul quanto do Hemisfério Norte.

Figura 49: Concentração de CH_4 em ppb, para cada perfil realizado, em azul escuro os perfis realizados nos meses da estação chuvosa e em vermelho os perfis da estação seca.

Figura 50: Série temporal de CH_4 para a média dos perfis verticais realizados em (a) ALF, (b) RBA, (c) SAN e (d) TAB, acima (azul) e abaixo (vermelho) da camada limite planetária, e as concentrações das duas estações de monitoramento global, ASC (laranja) e RPB (roxo) para este mesmo período.

Figura 51: Série temporal da concentração BKG de CH_4 para ALF, RBA, SAN e TAB e nas estações de monitoramento global de ASC e RPB.

Após remover a concentração BKG para cada local amostrado, foram calculados todos os fluxos de CH_4 para cada perfil pelo Método de Integração de Coluna (FIG.52), para o ano de 2010, e também as médias mensais. Observa-se que a Bacia Amazônica apresenta diferentes fluxos de emissão de CH_4 .

Figura 52: Fluxos médios mensais de CH_4 ($\text{mgCH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$) obtidos nos quatro locais de amostragem na Bacia Amazônica, ALF, RBA, SAN e TAB.

A região entre a costa e SAN apresentou um fluxo médio anual de emissão de CH_4 de $56,4 \pm 22,5 \text{ mgCH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$, onde 22,5 é a variabilidade apresentada entre as médias mensais no ano de 2010. Esta região apresentou uma maior emissão deste gás comparado as outras regiões estudadas. A região entre a costa brasileira e ALF apresentou o menor fluxo médio anual de emissão de $17,1 \pm 2,3 \text{ mgCH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$. As regiões de TAB e RBA apresentaram resultados semelhantes, com um fluxo médio anual de emissão de $18,7 \pm 4,2 \text{ mgCH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ e $19,3 \pm 10,2 \text{ mgCH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$, respectivamente. Estes resultados indicam que o fluxo obtido em SAN apresenta maior emissão de CH_4 que nas demais regiões da Bacia Amazônica, que apresentaram comportamento semelhante. Estes fluxos foram extrapolados para a área de representatividade de cada local de amostragem, levando-se em consideração suas áreas, definidas por meio das trajetórias retrocedentes calculadas pelo modelo HYSPLIT para cada altitude dos voos

realizados, em SAN (1.289.793km²), ALF (2.238.170km²), TAB (2.958.936km²) e RBA (4.767.175km²) (FIG.53). Verifica-se que sendo a área de SAN quase um quarto da área de RBA, sua emissão corresponde a 76% da emissão relativa a área de RBA. Sendo a região de ALF a que apresenta a menor emissão de CH₄.

Figura 53: Mapa do Brasil contendo o fluxo de CH₄ (TgCH₄.ano⁻¹) referente a área de representatividade de cada local de amostragem, entre a costa brasileira e (rosa) SAN, (amarelo) ALF, (azul) TAB e (branco) RBA.

A região representada pelos perfis de avião em SAN tanto podem ter um maior fluxo natural como antropogênico. Este método permite observar o resultado final da totalidade dos processos que ocorrem entre a costa e o local dos perfis de avião. O Estado do Pará vem sofrendo um rápido desflorestamento causado pela grande expansão da produção pecuária e agrícola e pela exploração insustentável da floresta (BACHA & RODRIGUEZ, 2006). Segundo dados do (IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) para o ano de 2009, o Estado do Pará é o maior criador de búfalos no Brasil, representando 38,5% (435.937 cabeças) do rebanho bubalino nacional (FIG.54). A Ilha do Marajó, que está localizada no Estado do Pará, a 632km do local de amostragem (FIG.55), representa 69,7% (303.916 cabeças) do rebanho bubalino deste Estado. Observa-se também na FIG.54 que os

três Estados com os maiores rebanhos de búfalos do Brasil são Pará, Amapá e Maranhão, estes representam 63,5% do rebanho de bubalinos do Brasil e estão os três dentro da região de SAN. Portanto, seu alto índice de emissão de CH_4 deve estar relacionado a estas atividades. Em estudo conjunto com economistas que trabalham neste tema, esta correlação foi identificada como tendo 39% de correlação com criação de gado e 68% com atividades humanas. Estas atividades estão relacionadas a geração de detritos, que em sua decomposição emitem CH_4 (CHIMELI et al., 2011).

Figura 54: Os dez Estados com maior rebanho de búfalos no Brasil para o ano de 2009. (Fonte: IBGE, <http://serieestatisticas.ibge.gov.br/series.aspx?vcodigo=PPM01&t=efetivo-dos-rebanhos-por-tipo-de-rebanho>, acesso em: março de 2011).

Figura 55: Imagem de satélite da localização de (a) Santarém e (b) Ilha do Marajó (Fonte: Google Mapas, acesso em: maio de 2011).

A FIG.56 mostra o teor total de água no solo por mês na região da Bacia Amazônica (os dados mapeados foram obtidos a partir do *Global Land Data Assimilation System* – GLDAS, disponíveis em: ftp://podaac-ftp.jpl.nasa.gov/allData/tellus/L3/gldas_monthly/browse/), para o período entre 2004 e 2008, observa-se que a região de SAN apresenta um maior teor de água no solo durante os meses da estação chuvosa (janeiro a maio), variando ano a ano, em comparação com as outras regiões de estudo da Bacia Amazônica, o que poderia resultar em maior emissão de CH₄.

Figura 56: Total mensal do teor total de água no solo para o período entre 2004 e 2008, o valor obtido em cada mês foi subtraído da média calculada para o período entre janeiro de 2003 a dezembro de 2007 (Fonte: GLDAS, disponíveis em: ftp://podaac-ftp.jpl.nasa.gov/allData/tellus/L3/gldas_monthly/browse/, acesso em: maio de 2011).

Observa-se nas trajetórias retrocedentes de SAN que a maior parte das massas de ar que chegam a esta região passam sobre a Ilha do Marajó (FIG.57), portanto a emissão de CH₄, proveniente tanto pela fermentação entérica e dejetos da criação de búfalos, como das áreas alagadas desta região, pode influenciar o alto fluxo de CH₄ observado em SAN. Nos meses de maio a julho (final da estação chuvosa e início da estação seca) o teor de água no solo diminui nesta região e a

maior parte das trajetórias das massas de ar que chegam a SAN mudam de direção, nestes meses, passando por uma região abaixo da Ilha do Marajó (FIG.57), pois neste período os ventos alísios mudam de direção, podendo influenciar na diminuição do fluxo de CH_4 observado nestes meses para a região de SAN.

Figura 57: Trajetórias retrocedentes de SAN por mês, (vermelho) 500m; (laranja) 1000m; (amarelo) 1500m; (verde) 2000m; (azul claro) 2500m; (anil) 3000m; (lilás) 3500m; (branco) 4000m; e (preto) 4500m.

Pelo fato das áreas representadas por TAB e RBA serem as que melhor representam a Bacia Amazônica, pois as massas de ar que chegam a estas regiões percorrem grande parte da área da Bacia, sendo suas áreas aproximadamente 3,0 milhões km² e 4,8 milhões km², respectivamente, e considerando ainda que os resultados obtidos nestes locais foram próximos, extrapolou-se estes resultados para toda a área da Bacia (5 milhões de km²), obtendo-se uma emissão de $34,7 \pm 13,5 \text{TgCH}_4.\text{ano}^{-1}$. Comparando este valor com os dados de emissão brasileira de CH₄ do MCT (2010) e com a base de dados EDGAR para o ano de 2005, de 18,1TgCH₄ e 23,4TgCH₄, respectivamente, observamos que o fluxo de emissão obtido para a região da Bacia é maior que o estimado para todo o território nacional por estas duas fontes.

O resultado obtido para a Bacia Amazônica neste estudo ($34,7 \pm 13,5 \text{TgCH}_4.\text{ano}^{-1}$) é próximo do valor encontrado por Melack et al. (2004), $29 \text{TgCH}_4.\text{ano}^{-1}$, está entre a estimativa de Carmo et al. (2006), entre 4 e $38 \text{Tg}.\text{ano}^{-1}$ e segundo estudo por satélite de Bergamaschi et al. (2009) foi encontrado para a Bacia Amazônica (8 milhões km²) a emissão de $44,2 \text{TgCH}_4.\text{ano}^{-1}$.

5.4 Verificação da regionalidade dos resultados de fluxo pela integração dos perfis verticais

Com o objetivo de verificar se os fluxos observados entre a costa e ALF, RBA, SAN e TAB apresentam uma representatividade regional ou local, realizou-se um estudo considerando apenas as concentrações obtidas acima de 1000m, isto é, sem os valores abaixo da CLP. Portanto para este cálculo foram subtraídas as concentrações medidas nas 3 altitudes inferiores do perfil vertical, em torno de 400, 600 e 900m para ALF e 300, 600 e 900m para RBA, SAN e TAB. Os fluxos médios anuais resultantes estão apresentados na TAB.8.

Tabela 8: Comparação dos fluxos de CH₄ calculados com todas as altitudes do perfil e com as altitudes acima de 1000m.

Fluxos (mgCH ₄ .m ⁻² .dia ⁻¹)	ALF	RBA	SAN	TAB
Fluxo com todo o perfil	17,1 ± 2,3	19,3 ± 10,2	53,0 ± 27,9	18,7 ± 4,2
Fluxo acima de 1000m	16,9 ± 3,0	16,5 ± 1,9	46,9 ± 28,3	17,9 ± 4,0
Diferença	0,2 (1%)	2,8 (21%)	6,1(12%)	0,8 (4%)

5 Resultados e Discussão

Estes resultados demonstram que os fluxos obtidos em ALF, RBA, SAN e TAB (FIG.58) possuem uma representatividade regional, pois apenas uma pequena parcela deste fluxo (entre 1 e 21%) é de origem local.

Figura 58: Comparação do fluxo de CH₄ com todas as altitudes do perfil vertical (azul) e o fluxo recalculado para ALF, RBA, SAN e TAB sem as altitudes abaixo de 1000m (vermelho).

Ao observar a FIG.58 verifica-se que o fluxo de RBA acima de 1000m obtido em outubro apresentou uma grande redução em comparação com o fluxo calculado com todas as altitudes do perfil vertical, pois o voo realizado no dia 27/10/2010 em RBA apresentou uma grande emissão de CH_4 principalmente nas 3 altitudes inferiores do perfil, demonstrando que pode ser uma fonte local. Se desconsiderar o fluxo deste voo na média mensal, o fluxo médio anual acima de 1000m sem as 3 altitudes inferiores do perfil apresenta uma redução de $1,0\text{mgCH}_4.\text{m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ (7%) em comparação com o fluxo médio anual calculado com todas as altitudes do perfil vertical.

5.5 Teste do erro devido a falta de medida acima de 4,4km de altitude

Os perfis verticais de avião foram realizados até 4,4km de altura, por ser a altura máxima que os aviões utilizados na amostragem alcançam sem o uso de oxigênio para os pilotos. Considerando que a concentração de CH_4 no topo do perfil é diferente do valor de BKG, esta diferença corresponderia a um fluxo que não estaria sendo computado em nossos cálculos. Com o objetivo de avaliar esta possível perda, considerou-se que, numa situação drástica, na altura de 10km a concentração seria igual ao BKG (FIG.59). Supondo uma diminuição gradual até o valor de BKG, os resultados de fluxo de CH_4 obtidos neste teste estão apresentados na TAB.9.

Figura 59: Exemplos dos perfis verticais realizados; (azul) concentrações medidas nos perfis e (vermelho) as concentrações adotadas para o cálculo do fluxo até 10km.

Tabela 9: Comparação dos fluxos de CH₄ calculados até 4,4km e até 10km.

Fluxos (mgCH ₄ .m ⁻² .dia ⁻¹)	ALF	RBA	SAN	TAB
Fluxo até 4,4km	17,1 ± 2,3	19,3 ± 10,2	53,0 ± 27,9	18,7 ± 4,2
Fluxo até 10km	19,7 ± 2,8	19,8 ± 3,1	65,7 ± 27,0	21,1 ± 4,8
Diferença	2,6 (15%)	0,4 (2%)	9,3(17%)	2,5 (13%)

Estes resultados indicam que os fluxos calculados até 4,4km pelo Método de Integração de Coluna podem apresentar uma perda para a atmosfera entre 2 e 17%, mostrando assim que o possível erro devido a altitude máxima estudada subestima em até 17% a emissão de CH₄. Estes resultados foram estimados para a área de representatividade de cada local, SAN (1.289.793km²), ALF (2.238.170km²), TAB (2.958.936km²) e RBA (4.767.175km²) e estão apresentados na FIG.60.

Figura 60: Mapa dos quatro locais de amostragem comparando os fluxos (TgCH₄.m⁻².dia⁻¹) calculados até 4,4km e os fluxos até 10km; (rosa) SAN, (amarelo) ALF, (azul) TAB e (branco) RBA.

5.5 Fluxo de CH₄ Proveniente da Queima de Biomassa

Conforme apresentado no item 4.7, foi calculada a emissão de CH₄ oriunda da queima de biomassa. Após remover esta emissão utilizando a razão de 6,4ppbCO/ppbCH₄ calculada neste estudo, o fluxo resultante foi denominado como fluxo biogênico de CH₄. O fluxo médio biogênico anual obtido para a região de SAN,

entre os anos de 2000 e 2010, foi de $48,1 \pm 21,7 \text{ mgCH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ e o fluxo médio anual proveniente da queima de biomassa, foi de $4,9 \pm 6,9 \text{ mgCH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$. A FIG.61 apresenta o fluxo total de CH_4 e os fluxos biogênicos e provenientes da queima de biomassa. O fluxo obtido entre janeiro e março (período de maior intensidade das chuvas) foi de $79,6 \pm 49,1 \text{ mgCH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$, entre abril e junho de $31,2 \pm 18,4 \text{ mgCH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ e durante a estação seca (julho a dezembro) $42,7 \pm 21,7 \text{ mgCH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$. Este fluxo resultante (biogênico) é a soma de todas as fontes existentes na região de influência, sem considerar o fluxo proveniente da queima de biomassa. O Método de Integração de Coluna dos perfis verticais por avião estima a soma de todos os fluxos, não sendo capaz de atribuir a influência no fluxo de fontes específicas presentes na região de representatividade de cada local de estudo.

Observa-se que a emissão por queima de biomassa na região de SAN aumenta gradativamente de julho a novembro, mês em que atinge seu ápice. A contribuição da queima de biomassa entre os meses de julho e dezembro representa 20% do fluxo total de CH_4 obtido na região entre a costa brasileira e SAN e 9% quando consideramos todo o ano de 2010.

Figura 61: Média mensal do fluxo total de CH_4 (preto), fluxo de CH_4 biogênico (verde) e fluxo de CH_4 oriundo da queima de biomassa (vermelho) de 2000 a 2010 obtido na região entre a costa e SAN.

Na FIG.62 pode-se observar a comparação entre o fluxo total de CH_4 , o fluxo biogênico e o fluxo proveniente da queima de biomassa para a região de ALF. Após a remoção do CH_4 emitido pela queima de biomassa, a emissão média anual de CH_4 biogênico em ALF foi de $13,2 \pm 3,1 \text{mgCH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ e o fluxo médio anual proveniente da queima de biomassa foi de $3,9 \pm 3,9 \text{mgCH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$. O fluxo obtido na estação chuvosa (entre os meses de outubro a maio, conforme FIG. 63) foi de $18,3 \pm 9,8 \text{mgCH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ e durante a estação (entre os meses de junho a setembro, conforme FIG.63) seca $3,2 \pm 4,0 \text{mgCH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$. Para o período onde ocorre a queima da biomassa, entre os meses de julho e novembro (na FIG.64 pode-se observar os focos de queimada para esta região no ano de 2010), a emissão de CH_4 pela queima de biomassa representou 70% do fluxo total e quando consideramos todo o ano de 2010 representou 23% do fluxo total anual. A maior emissão de CH_4 oriundo da queima de biomassa ocorreu no mês de agosto, diminuindo gradativamente até novembro.

Figura 62: Média mensal do fluxo total de CH_4 (preto), fluxo do CH_4 biogênico (verde) e fluxo do CH_4 oriundo da queima de biomassa (vermelho) para o ano de 2010 obtido na região entre a costa e ALF.

Esta alta contribuição da queima de biomassa nesta região pode ser explicada pela sua localização no limite da região do “Arco do Fogo”. A FIG.65 mostra as trajetórias desta região para o período entre julho e novembro e os focos

de queimada. Observa-se que a maior parte das massas de ar que chegam a este local recebe uma grande contribuição das queimadas.

Figura 63: Pluviometria mensal da região entre a costa brasileira e ALF, para o ano de 2010 (vermelho) e a média entre os anos de 1998 e 2010 (azul) (Fonte: TRMM, http://gdata1.sci.gsfc.nasa.gov/daac-bin/G3/gui.cgi?instance_id=TRMM_3-Hourly).

Figura 64: Focos de queimadas da região entre a costa brasileira e ALF, para o ano de 2010 (Fonte: <http://www.dpi.inpe.br/proarco/bdqueimadas/>).

Figura 65: Trajetórias retrocedentes de ALF calculadas pelo modelo HYSPLIT, (vermelho) 500m; (laranja) 1000m; (amarelo) 1500m; (verde) 2000m; (azul claro) 2500m; (anil) 3000m; (lilás) 3500m; (branco) 4000m; e (preto) 4500m; e os focos de queimada para os respectivos meses.

Após a remoção do CH_4 emitido pela queima de biomassa do fluxo total, obteve-se $17,0 \pm 6,3 \text{ mgCH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ de emissão biogênica para a região de RBA em 2010 e um fluxo médio anual proveniente da queima de biomassa de $2,3 \pm 2,9 \text{ mgCH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$. Na FIG.66 pode-se observar a comparação entre o fluxo total de CH_4 , o fluxo biogênico e o fluxo proveniente da queima de biomassa para esta região. Durante a estação chuvosa (entre os meses de outubro a junho, conforme pode ser observado na FIG.67), obteve-se um fluxo médio biogênico de $19,2 \pm 6,9 \text{ mgCH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ e na estação seca (entre os meses de julho e setembro, conforme FIG.67) de $10,3 \pm 2,3 \text{ mgCH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$. A contribuição da queima de biomassa entre os meses de julho e outubro (a FIG.68 apresenta os focos de queimada para esta região no ano de 2010) representou 31% do fluxo total de CH_4 obtido na região entre a costa brasileira e RBA e quando consideramos todo o ano de 2010 representou 12% do fluxo total anual. Observa-se que o mês de setembro

apresentou a maior emissão proveniente da queima de biomassa para esta região. E o mês de outubro apresentou uma alta emissão biogênica, indicando que existem fontes emissoras biogênicas importantes na Amazônia que não são de áreas alagáveis.

Figura 66: Média mensal do fluxo total de CH₄ (preto), fluxo do CH₄ biogênico (verde) e fluxo do CH₄ oriundo da queima de biomassa (vermelho) para o ano de 2010 obtido na região entre a costa e RBA.

Figura 67: Pluviometria mensal da região entre a costa brasileira e RBA, para o ano de 2010 (vermelho) e a média entre os anos de 1998 e 2010 (azul) (Fonte: TRMM, http://gdata1.sci.gsfc.nasa.gov/daac-bin/G3/gui.cgi?instance_id=TRMM_3-Hourly).

Figura 68: Focos de queimadas da região entre a costa brasileira e RBA, para o ano de 2010 (Fonte: <http://www.dpi.inpe.br/proarco/bdqueimadas/>).

Na FIG.69 são apresentados os resultados para a região entre a costa e TAB, onde pode-se observar a comparação entre o fluxo total, o fluxo biogênico e o fluxo proveniente da queima de biomassa. Após a remoção do CH_4 emitido pela queima de biomassa, que foi de $1,6 \pm 4,2 \text{ mgCH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$, obteve-se a emissão média anual biogênica de $17,1 \pm 3,0 \text{ mgCH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$.

Figura 69: Média mensal do fluxo total de CH_4 (preto), fluxo do CH_4 biogênico (verde) e fluxo do CH_4 oriundo da queima de biomassa (vermelho) para o ano de 2010 obtido na região entre a costa e TAB.

A emissão média de CH_4 biogênico na estação chuvosa (de outubro a junho, conforme a FIG.70) foi de $20,3 \pm 7,7 \text{mgCH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ e na estação seca (de julho a setembro, conforme FIG.70) de $7,3 \pm 2,2 \text{mgCH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$. A contribuição da queima de biomassa entre os meses de julho e outubro (a FIG.70 apresenta os focos de queimada para esta região no ano de 2010) representou 29% do fluxo total de CH_4 obtido na região entre a costa brasileira e TAB e quando consideramos o ano de 2010 representou 8% do fluxo total anual. Observa-se que o mês de setembro apresentou o maior fluxo de CH_4 proveniente da queima de biomassa, assim como a região entre a costa e RBA.

Figura 70: Pluviometria mensal da região entre a costa brasileira e TAB, para o ano de 2010 (vermelho) e a média entre os anos de 1998 e 2010 (azul) (Fonte: TRMM, http://gdata1.sci.gsfc.nasa.gov/daac-bin/G3/gui.cgi?instance_id=TRMM_3-Hourly).

A TAB.10 apresenta resumidamente as médias anuais dos fluxos totais, biogênicos e provenientes da queima de biomassa de CH_4 para os locais de estudo. A região de SAN apresentou um fluxo total de CH_4 elevado em comparação com os demais locais de estudo, o alto fluxo biogênico e o fluxo oriundo da queima de biomassa próximo do obtido na região de ALF, indicam que este fluxo observado é proveniente de fontes biogênicas existentes na região e não da queima de biomassa. Observando que ALF apresenta o menor fluxo de emissão e que esta região é a área mais impactada com mudança do uso do solo de floresta para outras atividades, conclui-se que esta região é carente de áreas alagáveis e que as atividades praticadas nela são pouco emissoras ou a absorção de CH_4 é bastante significativa.

Figura 71: Focos de queimadas da região entre a costa brasileira e TAB, para o ano de 2010 (Fonte: <http://www.dpi.inpe.br/proarco/bdqueimadas/>).

Tabela 10: Médias anuais dos fluxos de CH₄ obtidos nos quatro locais de estudo.

Médias anuais (mgCH ₄ .m ⁻² .dia ⁻¹)	SAN	TAB	RBA	ALF
Fluxo de CH₄ total	53,0 ± 27,9	18,7 ± 4,2	19,3 ± 10,2	17,1 ± 2,3
Fluxo de CH₄ biogênico	48,1 ± 21,7	17,1 ± 3,0	17,0 ± 6,3	13,2 ± 3,1
Fluxo de CH₄ da queima de biomassa	4,9 ± 6,9	1,6 ± 4,2	2,3 ± 2,9	3,9 ± 3,9

A FIG.72 apresenta os fluxos de CH₄ biogênicos e oriundos da queima de biomassa obtidos nos quatro locais de estudo que foram extrapolados para a área de representatividade de SAN (1.289.793km²), ALF (2.238.170km²), TAB (2.958.936km²) e RBA (4.767.175km²). Verifica-se que o fluxo biogênico estimado para a região de SAN é próximo ao estimado para a região de TAB e RBA, apesar da região de representatividade de SAN ser aproximadamente um quarto da região de RBA e metade da região de TAB, indicando que SAN apresenta um maior fluxo proveniente de fontes biogênicas e antropogênicas quando comparada as outras regiões. A região de SAN apresentou fluxo proveniente da queima de biomassa igual ao da região de TAB, e a região de ALF um fluxo próximo ao de RBA, indicando que as áreas de SAN e ALF estão localizadas em regiões da Bacia Amazônica com maior ocorrência de queima de biomassa.

Figura 72: Mapa do Brasil contendo os fluxos de CH_4 ($\text{TgCH}_4\cdot\text{ano}^{-1}$) referentes a área de representatividade de cada local de amostragem, entre a costa brasileira e (rosa) SAN, (amarelo) ALF, (azul) TAB e (branco) RBA para a emissão biogênica (esquerdo) e oriunda de queima de biomassa (direito).

A FIG.73 apresenta a área de influência (“*footprint*”) calculada pelo Modelo de Dispersão de Partícula Lagrangiano FLEXPART (STOHL et al., 2005) para cada região de estudo, verifica-se que as regiões de maior influência para cada ponto com perfil de avião, são as regiões mais próximas e conforme vai distanciando a influência vai diminuindo.

Figura 73: Mapa do Brasil mostrando a região de influência (“*footprint*”) de cada região de estudo, (a) TAB; (b) SAN; (c) RBA; (d) ALF, calculadas pelo FLEXPART (Fonte: J. B. Miller, comunicação pessoal).

podem estar relacionados com a diferença observada nos fluxos de SAN e ALF, maior e menor fluxos de emissão, respectivamente. A FIG.75 apresenta um mapa da criação de gado no Brasil, até o ano de 2008, observa-se que o “*footprint*” de ALF abrange uma área com um grande número de cabeças de gado, diferentemente das demais regiões de estudo, além disso, esta área por ser bastante impactada tem uma emissão natural reduzida. Como a região de ALF é a área mais impactada com mudança do uso do solo, pode-se concluir que esta região necessita de mais estudos complementares para o entendimento do fluxo observado.

Figura 75: Mapa da criação de gado no Brasil até o ano de 2008, segundo os dados da Produção Pecuária Municipal (PPM) do IBGE. (Fonte: GUILHOTO e ICHIHARA, 2010).

6. CONCLUSÕES

As regiões entre a costa e ALF, RBA, SAN e TAB atuaram como fonte de CH₄ durante todo o ano de 2010. Os fluxos de CH₄, calculados pelo Método de Integração de Coluna, coincidem ao comportamento observado nas concentrações dos perfis verticais, isto é, maior concentração próximo a superfície. A região entre a costa e SAN apresentou o maior fluxo médio anual, para o ano de 2010, dentre os quatro locais ($56,4 \pm 22,5 \text{mgCH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$). Enquanto a região de ALF apresentou o menor fluxo de emissão ($17,1 \pm 2,3 \text{mgCH}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$) sendo que esta região apresentou a maior influência proveniente da queima de biomassa, 23% do fluxo total anual, devido a sua localização no limite da região do “Arco do Fogo”. A área de influência de ALF abrange uma área mais impactada com mudança do uso do solo de floresta para outras atividades e que as atividades praticadas nela são pouco emissoras ou a absorção de CH₄ é bastante significativa. TAB foi o local que apresentou a menor influência da queima de biomassa no fluxo de CH₄, 8%, pois esta área é mais preservada quando comparada as demais regiões de estudo, estando localizada em uma região em que há o domínio de floresta natural.

O fluxo de CH₄ de SAN no ano de 2010 apresentou uma sazonalidade diferente da observada entre os anos de 2000 e 2009. Devido ao fato de uma menor precipitação ter ocorrido durante a estação chuvosa, devendo assim ter ocorrido uma menor área de inundação não impactando a emissão de CH₄, indicando que pode haver outras fontes importantes na região.

Os locais que melhor representam toda a área da Bacia Amazônica Brasileira são RBA e TAB, extrapolando-se estes resultados para a área da Bacia Amazônica Brasileira (5 milhões km²), obteve-se um fluxo de $34,7 \pm 13,5 \text{TgCH}_4 \cdot \text{ano}^{-1}$. Esta emissão é maior do que o estimado para todo o território nacional pelo MCT (2010) e pela base de dados EDGAR para o ano de 2005, de $18,1 \text{TgCH}_4$ e $23,4 \text{TgCH}_4$, respectivamente. E está próxima do valor encontrado por Melack et al. (2004), $29 \text{TgCH}_4 \cdot \text{ano}^{-1}$, e entre a estimativa de Carmo et al. (2006), entre 4 e

38Tg.ano^{-1} , para esta mesma região, e segundo estudo por satélite de Bergamaschi et al., (2009), foi encontrado para a Bacia Amazônica (8 milhões km^2) a emissão de $44,2\text{TgCH}_4.\text{ano}^{-1}$.

Os fluxos obtidos para os quatro locais de estudo apresentam uma representatividade regional, pois apenas uma pequena parcela dos fluxos é de origem local (entre 1 e 21%). E podem apresentar uma possível perda de emissão entre 2 e 17%, de acordo com o teste realizado onde foi calculado o fluxo de CH_4 para cada local até 10km de altitude.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AHRENS, C.D. ***Essentials of Meteorology: An invitation to the Atmosphere***. 3.ed. Canadá: Brooks/Cole Thomson Learning, 2000.
2. ANDREAE, M.; MERLET, P. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning. ***Global Biogeochemical Cycles***, v. 0, n. 0, p. 1-12, 2001.
3. ARAGÃO, L.E.O.C.; YADVINDERM M.; BARBIER, N.; LIMA, A.; SHIMABUKURO, Y.; ANDERSON, L.; SAATCHI, S. Interactions between rainfall, deforestation and fires during recent years in the Brazilian Amazonia. ***Philosophical transactions of the Royal Society B***, v. 363, p. 1779-1785, 2008.
4. BACHA, C.; RODRIGUEZ, L. Profiability and social impacts of reduced impact logging in the Tapajós National Forest, Brazil - A case study. ***Ecological Economics***, v. 63, p. 70-77, 2006.
5. BAIRD, C. ***Química Ambiental***. 2.ed. São Paulo: Bookman, 2002.
6. BEKKI, S.; LAW, K.; PYLE, J. Effects of ozone depletion on atmospherich CH₄ and CO concentrations. ***Nature***, v. 371, p. 595-597, 1994.
7. BERGAMASCHI, P.; FRANKENBERG, C.; MEIRINK, J.F.; KROL, M.; VILLANI, M.G.; HOUWELING, S.; DENTENER, F.; DLUGOKENCKY, E. J., MILLER, J.B.; GATTI, L.V.; ENGEL, A.; LEVIN, I. Inverse modeling of global and regional CH₄ emissions using SCIAMACHY satellite retrievals, ***Journal of Geophysical Research***, v. 114, (D22301), 2009.
8. CARMO, J.; KELLER, M.; DIAS, J.; DE CAMARGO, P.; CRILL, P. A source of methane from upland forests in the Brazilian Amazon. ***Geophysical Research Letters***, v. 33, n. 4, 2006.
9. CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. ***Primeiro Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa - Relatórios de Referência - Emissões de Metano no Tratamento e na Disposição de Resíduos***. Brasília: Ministério da Ciência e Tecnologia, 2006.
10. CHIMELI, A.B.; GUILHOTO, J.; GATTI, L.V.; MILLER, J.B.; MARTINEWSKI, A.; D'AMELIO, M.T.S.; BASSO, L.S.; DOMINGUES, L.G.; CORREIA, C.S.C. Socio-Economic Drivers of Greenhouse Gas Emissions in the Brazilian Amazon: New Evidence from Santarem, Para. Em preparação. 2011.

11. CHOU, W.; WOLFSY, S.; HARRISS, R.; LIN, J.; GERBIG, C.; SACHSE, G. Net fluxes of CO₂ in Amazonia Derived from Aircraft Observations. ***Journal of Geophysical Research***, v. 107 (D22), p. 4614, 2002.
12. CONRAD, R.; SEILER, W. Influence of temperature, moisture, and organic carbon on the flux of H₂ and CO between soil and atmosphere: field studies in subtropical regions. ***Journal of Geophysical Research***, v. 90 (D3), p. 5699–5709, 1985.
13. CONTI, J. Considerações sobre as mudanças climáticas globais. ***Revista do Departamento de Geografia***, n. 16, p. 70-75, 2005.
14. D'AMÉLIO, M.T.S.. ***Estudo de gases de efeito estufa na Amazônia***. 2006. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.
15. D'AMELIO, M.T.S.D.; GATTI, L.V.; MILLER, J.B.; TANS, P. Regional N₂O fluxes in Amazonia derived from aircraft vertical profiles. ***Atmospheric Chemistry and Physics***, v. 9, p. 8785-8797, 2009.
16. DEMORE, W.B.; SANDER, S.P.; GOLDEN, D.M.; HAMPSON, R.F.; KURYLO, M.J.; HOWARD, C.J.; RAVISHANKARA, A.R.; KOLB, C.E.; MOLINA, M.J. Chemical kinetics and photochemical data for use in stratospheric modeling: Evaluation Number 12; ***Jet Propulsion Laboratory***, v. 97-4, 1997.
17. DLUGOKENCKY, E.; BRUHWILER, L.; WHITE, J.; EMMONS, L.; NOVELLI, P.; MONTZKA, S.; MASARIE, K.A.; LANG, P.M.; CROTWELL, A.M.; MILLER, J.B.; GATTI, L.V. Observational constraints on recent increases in the atmospheric CH₄ burden. ***Geophysical Research Letters***, v. 36, L18803, 2009.
18. DLUGOKENCKY, E.; DUTTON, E.; NOVELLI, P.; TANS, P.; MASARIE, K.A.; LANTZ, K.O.; MARDRONICH, S. Changes in the CH₄ and CO growth rates after the eruption of Mt. Pinatubo and their link with changes in tropical tropospheric UV flux. ***Geophysical Research Letter***, v. 23, p. 2761-2764, 1996.
19. DLUGOKENCKY, E.; WALTER, B.; MASARIE, K.; LANG, P.; KASISCHKE, E. Measurements of an anomalous global methane increase during 1998. ***Geophysical Research Letters***, v. 28, p. 499-502, 2001.
20. DRAXLER, R.; ROLPH, G. ***HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory)***, 2011. NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD. Disponível em: <http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>. Acesso em 20 jan. 2011.
21. EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. ***Primeiro Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa - Relatórios de Referência - Emissões de Metano da Pecuária***. Brasília: Ministério da Ciência e Tecnologia, 2006.

22. EPA - Environmental Protection Agency. ***Methane and Nitrous Oxide Emissions From Natural Sources***. Washington: EPA - Environmental Protection Agency, 2010.
23. EDGAR - European Commission, Joint Research Centre (JRC)/Netherlands Environmental Assessment Agency (PBL). ***Emissions Database for Global Atmospheric Research (EDGAR, release version 4.0)***. Disponível em: <<http://edgar.jrc.ec.europa.eu>>. Acesso em: 03 mai. 2009.
24. FEARNSIDE, P. ***A Floresta Amazônica nas Mudanças Globais***. Manaus: INPA, 2003.
25. FEARNSIDE, P. Hidrelétricas como "fábricas de Metano": o papel dos reservatórios em áreas de floresta tropical na emissão de Gases de Efeito Estufa. ***Oecologia Brasilienses***, v. 12, p. 100-115, 2008.
26. GATTI, L.V.; MILLER, J.B.; D'AMELIO, M.T.S.; MARTINEWSKI, A.; BASSO, L.S.; GLOOR, M.; WOFSY, S.; TANS, P. Vertical profiles of CO₂ above eastern Amazonia suggest a net carbon flux to the atmosphere and balance biosphere between 2000 and 2009. ***Tellus B Chemical and Physical Meteorology***, v. 62, 2010.
27. GUILHOTO, J.J.M.; ICHIHARA, S.M. Biofuel and landuse in Brazil economic & social perspective. In: THE THIRD BERKELEY CONFERENCE ON THE BIOECONOMY, 2010, Berkeley, Michigan. Disponível em: <http://www.berkeleybioeconomy.com/wp-content/uploads/2010/07/Guilhoto_biofuel%20&%20Land%20Brazil%20Berkeley%20June%2010.pdf>. Acesso em: 02 jun. 2011.
28. GLDAS - Global Land Data Assimilation System. Disponível em: <ftp://podaac-ftp.jpl.nasa.gov/allData/tellus/L3/gldas_monthly/browse/>. Acesso em 16 mai. 2011.
29. HyDIS (Hydrologic Data and Information System). Disponível em: <http://hydis8.eng.uci.edu/hydis-unesco/HYSPLIT>. Acesso em: 16 fev. 2011.
30. HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory). Disponível em: < http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT_traj.php>. Acesso em: 15 jan. 2011.
31. IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). Séries Estatísticas e Séries Históricas. Disponível em: <http://seriesestatisticas.ibge.gov.br/series.aspx?vcodigo=PPM01&t=efetivo-dos-rebanhos-por-tipo-de-rebanho>. Acesso em: 4 abr. 2011.
32. INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). Banco de dados de queimadas CPTEC/INPE (Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos/ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/proarco/bdqueimadas/>. Acesso em: 17 fev. 2011.

33. IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of Intergovernmental Panel on Climate Change.** eds. Solomon, S.; Qin, D.; Manning, M.; Marquis, M.; Averyt, K.; Tignor, M.M.B.; Miller Jr, H.L.; Chen, Z. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, 2007.
34. KEPPLER, M.; HAMILTON, J.; BRASS, M.; RÖCKMANN, T. Methane emissions from terrestrial plants under aerobic conditions. **Nature**, v. 439, n. 7073, 2006.
35. KUHN, U.; ANDREAE, M.O.; AMMANN, C.; ARAÚJO, A.C.; BRANCALEONI, E.; CICCIOI, P.; DINDORF, T.; FRATTONI, M.; GATTI, L.V.; GANZEVELD, L.; KRUIJT, B.; LELIEVELD, J.; LLOYD, J.; MEIXNER, F.X.; NOBRE, A.D.; PÖSCHL, U.; SPIRIG, C.; STEFANI, P.; THIELMANN, A.; VALENTINI, R.; KESSELMEIER J. Isoprene and monoterpene fluxes from central Amazonian rainforest inferred from tower-based and airborne measurements, and implications on the atmospheric chemistry and the local carbon budget. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 7, p. 2855–2879, 2007.
36. LBA-2. **Plano Científico LBA2** - Programa de Pesquisas sobre Interação Biosfera-Atmosfera na Amazônia, 2007. Disponível em: <http://150.163.158.28/lba/site/?p=plano_cientifico_LBA2_vf2_1&t=1>. Acesso em: 13 mar. 2011.
37. LENZI, E.; FAVERO, L.O. **Introdução à Química da Atmosfera: Ciência, vida e sobrevivência.** Rio de Janeiro: LTC, 2009.
38. LEWIS, S.; BRANDO, P.; PHILLIPS, O.; VAN DER HEIJDEN, G.; NEPSTAD, D. The 2010 Amazon drought. **Science**, v. 331, 2011.
39. MALHI, Y.; GRACE, J. Tropical forests and atmospheric carbon dioxide. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 15, p. 332-337, 2000.
40. MALHI, Y.; PHILLIPS, O. **Tropical forests and global atmospheric change.** Nova York, EUA: Oxford University Press, 2005.
41. MALHI, Y.; MEIR, P.; BROWN, S. Forests, carbon and global climate. **Philosophical Transactions Royal Society Lond. A**, v. 360, p. 1567-1591, 2002.
42. MARENGO, J. **Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade: caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI.** 2º ed. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Biodiversidade e Florestas, 2007.
43. MCGINN, S.M.; FLESCH, T.K.; HARPER, L.A.; BEAUCHEMIN, K.A. An approach for measuring methane emissions from whole farms. **Journal of Environmental Quality**, v. 35, p. 14-20, 2006.

44. MCT - Ministério da Ciência e Tecnologia. **Segunda Comunicação Nacional à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima**. Brasília, 2010.
45. MELACK, J.; HESS, L.; GASTIL, M.; FORSBERG, B.; HAMILTON, S.; LIMA, I.; NOVO, M.L.M.E. Regionalization of methane emissions in the Amazon Basin with microwave remote sensing. **Global Change Biology**, v. 10, n. 5, 2004.
46. MILLER, J.B.; GATTI, L.V.; D'AMELIO, M.T.S.C.; CROTWELL, A.; DLUGOCKENKY, E.; BAKWIN, P.; ARTAXO, P.; TANS, P. Airbone measurements indicate large methane emissions from the eastern Amazon Basin. **Journal of Geophysical Research**, v. 34, L10809, 2007.
47. OLIVIER, J.; BOUWMAN, A.; BERDOWSKI, J.; VELDT, C.; BLOOS, J.; VISSCHEDIJK, A.; VAN DE MAAS, C.W.M.; ZANDWELD, P.Y.J. Sectorial emission inventories of greenhouse gases for 1990 on per country basis as well as on 10 x 10. **Environmental Science & Policy**, v. 2, p. 241-264, 1999.
48. PAZINATO, J. **Isolamento e identificação de microrganismos metanogênicos em solos de Terra Preta Antropogênia (TPA) e de Várzea (Gleissolos) da Amazônia Oriental**. 2007. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, Piracicaba.
49. PRODES. Relatório PRODES 2008, 2008. Disponível em: <http://www.obt.inpe.br/prodes/Relatorio_Prodes2008.pdf>. Acesso em: 05 abr. 2011.
50. QUERINO, C.; SMEETS, C.; VIGANO, I.; HOLZINGER, R.; MOURA, V.; GATTI, L.V.; MARTINEWSKI, A.; MANZI, A.; ARAUJO, A.; RÖCKMANN, T. Methane flux, vertical gradient and mixing ratio measurements in a tropical forest. **Atmospheric Chemistry and Physics**. Discuss., v. 11, p. 5313-5350, 2011.
51. SCHIMIDT, G. **Methane: a scientific journey from obscurity to climate superstardom NAA GISS research features**, 2004. Disponível em: <http://www.giss.nasa.gov/research/features/200409_methane/>. Acesso em 26 mar. 2011.
52. SPIVAKOVSKY, C.M.; LOGAN, J.A.; JONES, D.B.A.; FUSCO, A.C.; MONTZKA, S.A.; BALKANSKI, Y.J.; FOREMAN-FOWLER, M.; HOROWITZ, L.W.; BRENNINKMEIJER, C.A.M.; PRATHER, M. J. Three-dimensional climatological distribution of tropospheric OH - Update and evaluation. **Journal of Geophysical Research**, v. 105, n. D7, p. 8931-8980, 2000.
53. STOHL, A.; FORSTER, C.; FRANK, A.; SEIBERT, P.; WOTAWA, G. Technical note: TheLagrangian particle dispersion model FLEXPART version 6.2, **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 5, n. 9, p. 2461-2474, 2005.
54. STULL, R.B. **Mean Boundary Layer Characteristics**. In: An Introduction to Boundary Layer Meteorology, Boston, EUA: Kluwer Academic Publishers, 1991. cap. 1, p. 2-26.

55. SUGIMOTO, A.; WADA, E. Hydrogen isotopic composition of bacterial methane: CO₂/H₂ reduction and acetate fermentation. ***Geochimica et Cosmochimica Acta***. v. 59, n. 7, p. 1329-1337, 1995.
56. TRMM - Tropical Rainfall Measuring Mission. Disponível em <http://gdata1.sci.gsfc.nasa.gov/daac-bin/G3/gui.cgi?instance_id=TRMM_3-Hourly>. Acesso em junho de 2011.
57. WMO - World Meteorological Organization. ***Greenhouse Gas Bulletin - The state of Greenhouse gases in the atmosphere using global observation throught 2009***. n. 6, 2010. Disponível em: <http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/ghg/documents/GHG_bull_6en.pdf>. Acesso em 07 mar. 2011.
58. WMO - World Meteorological Organization - Global Atmosphere Watch - World Data Centre for Greenhouse Gases. ***WMO WDCGG Data Summary***, n. 35 v. 4. Japan Meteorological Agency em cooperação com World Meteorological Organization, 2011.
59. WUEBBLES, D.J.; HAYHOE, K. Atmospheric methane and global change. ***Earth Science Reviews***. v. 52, p. 177-210, 2002.
60. YOKELSON, R.; CHRISTIAN, T.; KARL, T.; GUENTHER, A. The tropical forest and fire emissions experiment: laboratory fire measurements and synthesis of campaign data. ***Atmospheric Chemistry and Physics***, v. 8, p. 3509-3527, 2008.
61. YOKELSON, R.; KARL, T.; ARTAXO, P.; BLAKE, D.; CHRISTIAN, T.; GRIFFITH, D.; GUENTHER, A.; HAO, W.M. The tropical forest and fire emissions experiment: Overview and airborne fire emissions experiment: Overview and airborne fire emission factor measurements. ***Atmospheric Chemistry and Physics***, v. 7, p. 5175-5196, 2007.