

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
CENTRO DE ENERGIA NUCLEAR NA AGRICULTURA**

JOSÉ MAURO SOUSA DE MOURA

Fontes de metano em florestas tropicais da Amazônia: Análise da composição isotópica e uso de técnicas indiretas para determinação de balanços gasosos nesses ecossistemas

Piracicaba

2010

JOSÉ MAURO SOUSA DE MOURA

Fontes de metano em florestas tropicais da Amazônia: Análise da composição isotópica e uso de técnicas indiretas para determinação de balanços gasosos nesses ecossistemas

Tese apresentada ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de concentração: Química na Agricultura e no Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Reynaldo Luiz Victoria

Piracicaba

2010

AUTORIZO A DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Seção Técnica de Biblioteca - CENA/USP

Moura, José Mauro Sousa de

Fontes de metano em florestas tropicais da Amazônia: Análise da composição isotópica e uso de técnicas indiretas para determinação de balanços gasosos nesses ecossistemas / José Mauro Sousa de Moura; orientador Reynaldo Luiz Victoria. - - Piracicaba, 2010.

107 p.: fig.

Tese (Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Ciências. Área de Concentração: Química na Agricultura e no Ambiente) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo.

1. Carbono 2. Ecossistemas florestais 3. Efeito estufa
4. Espectrometria de massas 5. Fluxo turbulento dos gases 6. Isótopos estáveis 7. Radônio I. Título

CDU 504.7:546.296+547.211

Às minhas famílias...

À família **Moura**, da qual tenho imenso orgulho em fazer parte e à qual devo muito do que sou hoje, pelo apoio e compreensão de meus erros e acertos;

À família **Figueira**, pelo carinho com o qual me recebeu;

À família **Paisner Mendlovitz**, pela amizade e pela acolhida em sua residência em Chapel Hill, NC durante os períodos em que trabalhei da Universidade da Carolina do Norte

Dedico

A meu pai **Manoel Batista de Moura** (*in memoriam*) e à minha avó **Aristotelina de Sousa** (*in memoriam*), os quais partiram na reta final do meu doutorado, mas que jamais deixarão de existir em meus pensamentos, pelo amor e carinho que me dedicaram, deixando assim suas marcas na pessoa que sou hoje.

Ofereço

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Reynaldo Luiz Victoria, pela confiança depositada e pela oportunidade de firmar parcerias que foram além de minha proposta de doutorado.

Ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura e aos Laboratórios de Ecologia Isotópica e a Laboratório de Análise Ambiental e Geoprocessamento, por permitirem a realização deste trabalho em suas dependências;

À Universidade da Carolina do Norte- Chapel Hill, NC, por permitir a realização das análises isotópicas no Departamento de Ciências Marinhas, e aos amigos feitos nesta universidade, pela acolhida durante os períodos em trabalhei nas análises de minhas amostras e na redação deste manuscrito;

Agradeço especialmente aos pesquisadores e amigos Chris Martens, Howard Mendlovitz, Irene Cibelle, Mary Menton, Risonaldo Leal e Thomas Shay pela orientação e imensurável ajuda recebida desde 2000 quando ingressei no Projeto LBA-ECO;

Aos pesquisadores do Centro de Energia Nuclear na Agricultura pelo apoio durante o doutorado. Especialmente à Dra. Janaina Braga, Dr. Jean Ometto, Dr. Luiz Martinelli, Dr. Marcelo Moreira e Dr. Plinio Camargo, pelas contribuições a este trabalho e pelas oportunidades oferecidas;

À Dra. Susan Trumbore, pela ajuda nos cálculos do $\delta^{13}\text{C}$ das fontes líquidas de metano no dossel das florestas. Ao Dr. Jonh Miller pelas discussões sobre composição isotópica de CH_4 e por se dispor a realizar a intercalibração dos padrões usados na análise isotópica;

A Eráclito Neto, pela amizade e pela imensurável ajuda tanto nas coletas, quanto nas análises da concentração de metano no Laboratório de Ecologia Isotópica do CENA;

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pela concessão das bolsas de mestrado (Proc. N° 2003/03969-0) e doutorado (Proc. N° 2005/56386-8);

Ao MCT e à NASA Earth Science, pelos recursos financeiros através do Projeto LBA-ECO que permitiram a realização das medidas de Radônio (Proc. NCC5-337 e NCC5-713). Ao CNPq e ao Programa BECA-IEB/Fundação Moore pelas bolsas recebidas durante o Projeto LBA-ECO (Proc. 381345/00-9 e Proc. B/2005/02BDP/04);

Aos pesquisadores e funcionários do Projeto LBA-ECO (Escritório de Santarém), pelo apoio logístico e pelo acesso às torres de fluxo instaladas na Floresta Nacional do Tapajós. Ao Dr. Raimundo Cosme (Embrapa Santarém), pelo empréstimo das câmaras estáticas para medidas de fluxo de CH₄ e pela disponibilização dos dados de umidade do solo;

Ao Museu Emílio Goeldi, através dos pesquisadores Leonardo Sá e Rommel Silva e dos funcionários da Estação Científica Ferreira Penna na Floresta Nacional de Caxiuanã, pela acolhida na estação e por permitirem o acesso à torre de fluxo usada neste trabalho para a coleta de parte das amostras de metano;

À Comissão de Pós-Graduação do CENA e à Pró-Reitoria de Pesquisa da USP, pelos apoios financeiros que permitiram minha participação em conferências nacionais e internacionais;

Aos Funcionários do CENA, especialmente à secretária Neuda Fernandes e demais funcionários da Pós-Graduação, pelo esforço em descomplicar minha vida nos assuntos relacionados ao curso de doutorado;

Aos amigos (de A a Z, pra não correr o risco de esquecer ninguém!) pelo carinho de sempre. Serei sempre grato por tudo... pois muito devo a cada um de vocês;

À minha amiga e agora também esposa Michela Figueira, pelo suporte nos momentos de tristeza pelos quais passei nos últimos anos, pois sem esse suporte talvez hoje eu não estivesse completando essa fase da vida. Agradeço também pela compreensão nos muitos momentos em que o doutorado nos fez ficar distantes, e agradeço mais ainda pelos muitos momentos de felicidade que ela me proporcionou.

Tá tudo sob controle....

Manoel Batista de Moura

RESUMO

MOURA, J. M. S. **Fontes de metano em florestas tropicais da Amazônia: Análise da composição isotópica e uso de técnicas indiretas para determinação de balanços gasosos nesses ecossistemas**. 2010. 107 f. Tese (Doutorado) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba-SP, 2010.

Recentes publicações chamaram a atenção para o papel das florestas tropicais sobre o balanço global de alguns gases de efeito estufa. A suspeita de que estas florestas estariam atuando como sorvedouros de CO₂ acumulando uma enorme quantidade de carbono em sua biomassa, ou que estas seriam capazes de emitir CH₄ diretamente de folhas vivas e da serapilheira sobre condições aeróbicas, motivou a realização de vários estudos nas áreas de floresta tropical, especialmente na Amazônia. O presente estudo pretende determinar o papel das florestas de terra-firme da Amazônia no balanço regional de CH₄ através da análise de sua composição isotópica ($\delta^{13}\text{CH}_4$) e da discriminação de suas possíveis fontes no ecossistema. Em seguida, o trabalho mostrará o avanço na aplicação das medidas da atividade e do fluxo de Radônio-222 como traçador indireto dos balanços de CH₄ em florestas de terra-firme. As medidas $\delta^{13}\text{CH}_4$ foram realizadas em campanhas trimestrais no período entre 2006 e 2008, na Floresta Nacional do Tapajós (F.N.T.) e na Floresta Nacional de Caxiuanã (F.N.C.). O $\delta^{13}\text{CH}_4$ variou entre -49,24‰ e -45,50‰, com médias (\pm erro padrão) iguais a $-47,63 \pm 0,04\%$ e $-47,32 \pm 0,04\%$ para a F.N.C e F.N.T., respectivamente. A concentração de CH₄ variou entre 1,82 e 3,19ppm, com média (\pm erro padrão) igual a $2,08 \pm 0,02\text{ppm}$ na F.N.C e $2,11 \pm 0,02\text{ppm}$ na F.N.T. As medidas de fluxo e da atividade de ²²²Rn usadas neste trabalho foram realizadas no período entre 2000 e 2002. Durante este período o fluxo de ²²²Rn do solo variou entre 6,86 e 103,30 mBq m⁻² s⁻¹. A média geral para o período foi igual a $32,48 \pm 14,00 \text{ mBq m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Os valores da atividade de ²²²Rn variaram no perfil vertical da floresta de 5,27 a 18,17 Bq m⁻³, 3,55 a 24,02 Bq m⁻³ e 3,36 a 18,30 Bq m⁻³ durante os anos de 2000, 2001 e 2002, respectivamente. As estimativas das concentrações e do fluxo de CH₄ inferidas a partir dos dados de ²²²Rn, apresentaram variações semelhantes às variações medidas por cromatografia gasosa, indicando que o ²²²Rn tem o potencial de fornecer medidas independentes das taxas de fluxos de CH₄ em áreas de floresta de terra-firme.

Palavras-chave: Amazônia, Carbono, Ecossistemas florestais, Efeito estufa, Metano, Radônio (²²²Rn), Isótopos estáveis

ABSTRACT

MOURA, J. M. S. **Methane sources in Amazon tropical forests: analysis of isotopic composition and use of indirect techniques to determine gas balances in these ecosystems**. 2010. 107 p. Thesis (Doctorate) – Nuclear Energy Center for Agriculture, University of Sao Paulo, Piracicaba-SP, 2010.

Recent publications called the attention to the role of tropical forests on the budget of some important greenhouse gases. The finding that forests would acting as sink of large amounts of CO₂ or as a source of CH₄ emitted directly from green and dead leaves under aerobic conditions has motivated scientists worldwide to set experiments in tropical forest areas, especially in the Amazon. This study aims to determine the role of Amazonian upland forests to the regional budget of CH₄ through analysis of the stable isotopic composition of methane ($\delta^{13}\text{CH}_4$) and the discrimination of its possible sources in the ecosystem. This study also shows the attempt to use of ²²²Rn soil flux and activity measurements as an indirect tracer for CH₄ mixing ratios rates in the vertical profile of upland tropical forests. The measurements of $\delta^{13}\text{CH}_4$ were carried out during quarterly campaigns in the period from 2006 to 2008 in the Caxiuana National Forest (C.N.F.) and Tapajos National Forest (T.N.F.). The $\delta^{13}\text{CH}_4$ varied from -49.24‰ to -45.50‰, with overall means (\pm SE) equal to $-47.63\pm 0.04\%$, and $-47.32\pm 0.04\%$ for C.N.F. and T.N.F., respectively. The concentration of CH₄ varied from 1.82 to 3.19ppm, with mean (\pm SE) equal to 2.08 ± 0.02 ppm at C.N.F. and 2.11 ± 0.02 ppm at T.N.F.. ²²²Rn soil flux and activity measurements used in this work were taken in the period of 2000-2002. During this period the ²²²Rn soil flux varied from 6.86 to 103.30 mBq m⁻² s⁻¹, with overall mean equal to 32.49 ± 14.00 mBq m⁻² s⁻¹. The values for ²²²Rn activity along the vertical profile varied from 5.27 to 18.17 Bq m⁻³, 3.55 to 24.02 Bq m⁻³, and 3.36 to 18.30 Bq m⁻³, during the years of 2000, 2001, and 2002, respectively. Estimates of CH₄ concentrations and soil fluxes, inferred from ²²²Rn data, compared favorably with measurements done by gas chromatography, indicating that ²²²Rn has the potential to provide independent measurements of CH₄ fluxes in upland forests.

Key-words: Amazon, Carbon, Forest ecosystems, Greenhouse effect, methane, Radon (²²²Rn), stable isotopes.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFIA	20
2.1	Metano e suas vias de produção.....	20
2.2	Fontes e sumidouros de metano	20
2.3	Fontes do CH ₄ emitido no Brasil.....	22
2.4	Uso de isótopos estáveis no estudo de metano	25
2.5	Radônio (²²² Rn) e decaimento radioativo	27
2.6	Uso do ²²² Rn como traçador das taxas de troca entre o dossel de floresta e a atmosfera.....	30
2.7	Inferência do fluxo de metano a partir de medidas diretas de ²²² Rn.....	31
3	VARIAÇÃO NA CONCENTRAÇÃO E COMPOSIÇÃO ISOTÓPICA DE METANO EM FLORESTAS DE TERRA-FIRME NA AMAZÔNIA ORIENTAL	32
3.1	Introdução	34
3.2	Material e métodos	37
3.2.1	Áreas de estudo	37
3.2.1.1	Floresta de terra-firme na Flona Caxiuanã	37
3.2.1.2	Floresta de terra-firme na Flona Tapajós	38
3.2.1.3	Regimes pluviométricos	41
3.2.2	Amostragem	43
3.2.2.1	Coleta das amostras de metano no perfil vertical da floresta	43
3.2.2.2	Coleta das amostras de metano emitido pelo solo	44
3.2.3	Método Analítico.....	45
3.2.3.1	Análise da composição isotópica de metano.....	45
3.2.3.2	Cálculo do valor estimado do $\delta^{13}\text{C}$ da fonte líquida CH ₄ no dossel das florestas	46
3.2.3.3	Estimativa da contribuição de fontes biogênicas e pirogênicas para a composição isotópica do CH ₄ medido nas florestas.....	46
3.2.3.4	Análise da concentração de metano	47
3.2.4	Análises estatísticas	48
3.3	Resultados	49
3.3.1	Composição isotópica de metano no perfil vertical da floresta	49

3.3.2	Concentração de metano no perfil vertical da floresta.....	49
3.3.3	Estimativas da composição isotópica de fontes potenciais de CH ₄ e contribuição de fontes pirogênicas e biogênicas de CH ₄ em florestas	55
3.3.4	Fluxo de CH ₄ do solo.....	57
3.4	Discussão	58
3.5	Conclusão	66
4	VARIAÇÃO DA ATIVIDADE E EMISSÕES ²²² Rn DO SOLO EM FLORESTAS DE TERRA-FIRME DA AMAZÔNIA: BASES PARA O USO DE ²²² Rn COMO TRAÇADOR DE CH ₄ EM ECOSSISTEMAS TROPICAIS	68
4.1	Introdução	70
4.2	Material e métodos	73
4.2.1	Áreas de estudo	73
4.2.2	Detectores de ²²² Rn.....	75
4.2.3	Amostragem	77
4.2.3.1	Registro da atividade de ²²² Rn no perfil vertical da floresta	77
4.2.3.2	Registro do fluxo de ²²² Rn do solo.....	80
4.2.4	Análises estatísticas	81
4.3	Resultados e discussão.....	82
4.3.1	Fluxo de ²²² Rn do solo na Floresta Nacional do Tapajós (km 67 e km 83) e na área agrícola (km 77)	82
4.3.2	Atividade de ²²² Rn no perfil vertical da floresta	85
4.3.3	Inferência da concentração e fluxo de CH ₄ a partir de medidas diretas da atividade de ²²² Rn.....	89
4.4	Conclusão	92
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	93
	REFERÊNCIAS	94

Lista de Figuras

- Figura 1 - Séries de decaimento alfa e beta do Urânio-238. Em cinza, destaque para as séries de decaimento do ^{222}Rn . Adaptado de Lederer et al. (1968)..... 27
- Figura 2 – Localização das áreas de estudo no estado do Pará (A). Visualização das Florestas Nacionais do Tapajós (F.N.T.) e Caxiuanã (F.N.C.) e das torres de fluxo usadas para coletas das amostras (B). Detalhes da cobertura vegetal e do relevo em um raio de 10 km ao redor de cada torre (C)..... 40
- Figura 3 - Média mensal de precipitação nos municípios de Breves-PA (A) e em Belterra-PA (B). As linhas verticais tracejadas indicam o período de cada coleta. As linhas horizontais vermelhas indicam o limite entre as estações seca e intermediária e as linhas verdes indicam o limite entre a estação intermediária e chuvosa..... 41
- Figura 4 – Comparação entre os volumes médios de precipitação na Floresta Nacional de Caxiuanã (F.N.C.) e Floresta Nacional do Tapajós (F.N.T.) durante o período de amostragem..... 42
- Figura 5 – $\delta^{13}\text{CH}_4$ nos perfis verticais da F.N.C. e F.N.T.. Os dados representam a variação dos valores médios (\pm erro padrão) medidos durante as estações chuvosa, intermediária e seca. A linha tracejada representa a referência para os valores $\delta^{13}\text{CH}_4$ do ar atmosférico 51
- Figura 6 – Concentração de CH_4 nos perfis verticais da F.N.C. e F.N.T.. Os dados representam a variação dos valores médios (\pm erro padrão) medidos durante as estações chuvosa (Mai/07), intermediária (Jan/06, Dez/07, Dez/08) e seca (Jan/07, Out/07, Ago/08). A linha tracejada representa a média para os valores da concentração de CH_4 no ar atmosférico 52
- Figura 7 – Média anual dos valores de $\delta^{13}\text{CH}_4$ (esquerda) e de concentração de CH_4 (direita) nos perfis verticais das Florestas Nacionais de Caxiuanã (A) e Tapajós (B). As linhas tracejadas representam a média para os valores $\delta^{13}\text{CH}_4$ e concentração de CH_4 do ar atmosférico medido na

Ilha de Ascensão e em sobrevôos a 300m sobre a Floresta Nacional do Tapajós, respectivamente.....	53
Figura 8 - Fluxo de CH ₄ do solo na F.N.T.. Os dados representam as médias (±erro padrão) obtidas durante a estação seca (agosto e outubro) e durante a estação intermediária (dezembro). As linhas tracejadas cinza representam os valores médios de fluxo obtido por Varner e Keller (2008) e por Davidson <i>et al.</i> , (2008) em trabalhos realizados em áreas próximas durante a estação seca.....	57
Figura 9 – Localização dos focos de queimadas na F.N.T. (A) e na F.N.C. (B), número de focos (C) e densidade do número de focos (D) em um raio de 100 km em relação as torres de fluxo usadas para coletas de CH ₄ durante os anos de 2007 e 2008.....	61
Figura 10 – Localização da Floresta Nacional do Tapajós (F.N.T.) e dos locais de coleta de ²²² Rn	73
Figura 11 – Caracterização da mudança no uso do solo na área agrícola no período entre setembro/2000 e dezembro/2002	74
Figura 12 – Diferentes tipos de detectores de ²²² Rn utilizados para medições feitas nos perfis verticais das torres e de fluxo do solo	75
Figura 13 – Esquema simplificado da calibração dos detectores de ²²² Rn	76
Figura 14 - Torre vertical-65m (A); Sistema de medição da atividade de ²²² Rn do dossel (B), Sistema de medição da concentração de metano por cromatografia gasosa (C).....	78
Figura 15 – Exemplos do inventário da atividade de ²²² Rn medida ao longo do tempo (ano de 2001) no perfil vertical da floresta em diferentes alturas. A cobertura dos dados para cada período está expressa em porcentagem no canto superior esquerdo de cada gráfico. O gráfico inferior refere-se ao dia 15 de fevereiro de 2001	79
Figura 16 – Exemplo do registro do fluxo do solo (S) com 3 amostras. No gráfico, cada ponto (círculo vazio) representa o total de pulsos registrados pelo detector em um minuto e as rampas (círculo preenchidos) representam a relação linear entre o aumento da concentração e o tempo decorrido do fechamento da câmara.....	81
Figura 17 – Variação anual do fluxo de ²²² Rn do solo nos diferentes ecossistemas estudados. Os dados representam as médias (±erro	

padrão) dos valores para as amostras coletadas durante cada ano. Letras diferentes sobre as barras representam diferenças significativas entre as médias anuais	82
Figura 18 – Variação sazonal do fluxo de ^{222}Rn do solo nos diferentes ecossistemas estudados. Os dados representam as médias mensais (\pm erro padrão) dos valores para as amostras coletadas. A linha cinza pontilhada representa a média interanual observada em cada área estudada. O gráfico inferior apresenta a umidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) no perfil do solo no km67 (Oliveira, R.C., EMBRAPA, dados não publicados)	84
Figura 19 – Atividade de ^{222}Rn no perfil vertical da Floresta Nacional do Tapajós, km 67. Os dados representam as médias da atividade por altura medidas a cada 15 minutos durante os anos de 2000, 2001 e 2002	86
Figura 20 – Atividade de ^{222}Rn no perfil vertical da Floresta Nacional do Tapajós, km 67. Os dados representam as medianas da atividade medida ao longo do perfil durante os meses de maio e setembro (2000, 2001 e 2002). Os gráficos superiores correspondem ao período diurno e os inferiores ao período noturno.	88
Figura 21 – Perfis verticais da atividade de ^{222}Rn (A) e concentração de CH_4 (B) medidos na Flona Tapajós nos períodos entre 22-24/10/02 e 22-24/10/07, respectivamente. As linhas pretas representam os valores médios referentes às alturas 0,2m, 7,0m, 35,0m e 45,0m. As linhas cinzas representam os valores máximo e mínimo observados. A linha tracejada representa a estimativa para concentração de CH_4 com base na interpolação linear entre a concentração de CH_4 e a atividade de ^{222}Rn observadas	90
Figura 22 – Fluxo de CH_4 do solo na F.N.T.. A linha preta representa os valores médios de fluxo medidos durante a estação seca. A linha azul representa a estimativa para o fluxo de CH_4 modelada com base na interpolação linear entre o fluxo medido e a atividade de ^{222}Rn medida à altura de 0,3m.....	91

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Estimativas globais e variação das estimativas para fontes e sumidouros de CH ₄ . Adaptado de Lowe (2006)	21
Tabela 2 – Sumário das emissões e remoções antrópicas de gases de efeito estufa (GEE).....	23
Tabela 3 – Emissões de gases de efeito estufa para o período de 1990-2005.....	24
Tabela 4 – Cenários de inventários globais de fontes naturais e antropogênicas e composição isotópica ($\delta^{13}\text{C}$) de metano. Adaptado de Lassey et al. (2000)	26
Tabela 5 – Fluxos de ²²² Rn de solos naturais. Adaptado de Conen e Robertson (2002)	29
Tabela 6 – Período de coletas e número (<i>n</i>) de amostras analisadas em cada estação do ano quanto à composição isotópica ($\delta^{13}\text{CH}_4$) e concentração de metano [CH ₄], na Floresta Nacional de Caxiuanã (F.N.C.) e Tapajós (F.N.T.).....	44
Tabela 7 – Medianas e os valores de <i>p</i> obtidos na análise de “Kruskal–Wallis” na comparação entre os valores de $\delta^{13}\text{CH}_4$ e concentração das amostras CH ₄ coletadas ao longo do perfil vertical da floresta entre as estações chuvosa, intermediária e seca. As alturas 7,0m e 15m, assim como as alturas 22m e 35m, foram agrupadas para formarem os compartimentos sub-bosque e copa, respectivamente.....	54
Tabela 8 – Valores estimados de $\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$ da fonte potencial de metano ao longo do perfil vertical da floresta entre as estações do ano e média anual, calculados através de balanços de massa. As alturas 7,0m e 15m, assim como as alturas 22m e 35m, foram agrupadas para formarem os compartimentos sub-bosque e copa, respectivamente.....	55
Tabela 9 – Estimativas da contribuição de fontes pirogênicas e biogênicas de CH ₄ na Floresta Nacional do Tapajós e Floresta Nacional de Caxiuanã....	56
Tabela 10 – Valores médios ($\bar{\chi}$) e desvio padrão (σ) da atividade de ²²² Rn medida em diferentes alturas do perfil vertical da torre na Floresta Nacional do Tapajós, durante os meses de maio e setembro de 2001	89

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas formou-se no meio científico um forte consenso de que as mudanças climáticas globais resultam do acelerado aumento das concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera (SCHWEIZER et al., 2009). O aumento do número de estudos sobre essas mudanças, o avanço nas técnicas de medidas diretas das variáveis climáticas, assim como o crescimento da capacidade de inferir e/ou simular cenários do passado, nos permitem observar que a rapidez com que essas mudanças vem ocorrendo recentemente é algo que jamais foi experimentado na história da humanidade.

Em 2007, o IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) publicou seu 4º relatório de avaliação onde são descritos os avanços da comunidade científica no que diz respeito à compilação e análise de dados sobre fatores causadores de mudanças climáticas, no entendimento dos efeitos das ações humanas e naturais sobre essas mudanças e na realização das projeções para o futuro. Como o IPCC não realiza pesquisas propriamente ditas, nem tampouco constrói bancos de dados, suas avaliações são baseadas em publicações técnicas e científicas que passaram por revisões de acordo com a editoração de onde foram publicadas. Embora exista um altíssimo rigor na avaliação das séries de dados a serem usadas como referência nos relatórios, assim como na supervisão da publicação, realizada por especialistas das mais diversas áreas do conhecimento, um dos grandes desafios dos grupos de trabalho que compõem o painel é a integração de dados obtidos através de diferentes metodologias e com grau de incertezas peculiares.

Aliado a isso, temos o fato que, as séries de dados mais prolongadas e mais confiáveis vem de instituições de pesquisa localizadas em regiões específicas do globo, principalmente nos países ricos do hemisfério Norte. Como consequência, os papéis dos biomas localizados em regiões do globo menos habitadas ou com poucos centros de pesquisa, como a Amazônia, podem não ser considerados em sua totalidade nas estimativas globais das variáveis climáticas.

No último século a temperatura global se elevou em pelo menos 0,5°C e as previsões para as próximas décadas são para um aumento proporcionalmente maior (HANSEN et al., 2001; JONES; MOBERG, 2003; IPCC, 2007). A causa mais provável para esse aumento da temperatura seria o aumento nas concentrações de

gases de efeito estufa na atmosfera impedindo a dissipação da radiação solar refletida pela terra (HANSEN; SATO, 2004; HANSEN et al., 2007; IPCC, 2007; MARCHETTINI et al., 2009) .

A estimativa de aumento das concentrações apresentada pelo IPCC para emissões globais antrópicas de gases de efeito estufa, mostra que em 2004 as emissões globais somavam 49 Gt-CO₂-equivalente e eram 24% maiores em relação ao ano de 1990 (IPCC, 2007).

No Brasil, também se observa a mesma tendência de aumento das concentrações dos gases de efeito estufa observada globalmente. Cerri et al. (2009) estimaram um aumento de aproximadamente 25% nas emissões nacionais de três importantes gases de efeito estufa no Brasil (CO₂, CH₄ e N₂O). Por outro lado, dados do Ministério de Ciência e Tecnologia (2009) mostram que este aumento foi superior a 60%.

A comparação entre os inventários propostos pelo MCT e por Cerri et al. é importante pois não somente evidencia a tendência de crescimento das emissões brasileiras, como também mostra a incerteza empregada nos levantamentos dessas emissões. A discrepância observada na porcentagem do aumento das emissões, 62% do MCT contra apenas 25% proposto por Cerri et al., mostra que inventariar as emissões de um país com tanta diversidade de biomas e características sócio-ambientais como o Brasil, é uma área em que os governos e a comunidade científica ainda tem muito em que melhorar.

O Brasil se classifica atualmente como um dos principais emissores de gases de efeito estufa devido principalmente às emissões relacionadas pela queima de biomassa decorrentes da conversão de suas florestas em pastagens ou áreas agrícolas (Cerri et al., 2007). Em contrapartida, o país também aparece no cenário mundial como um possível agente mitigador dos efeitos do aquecimento global visto que ainda contém uma grande parte do seu território, especialmente a região amazônica, coberta por florestas tropicais, as quais poderiam absorver o carbono da atmosfera e aloca-lo na forma de biomassa vegetal.

Aliás, o papel da Amazônia como agente controlador do clima vem sendo bastante discutido nas últimas décadas. Devido à grandiosidade de seu território e a interação entre os ecossistemas aquáticos e a floresta que recobre a bacia de drenagem do rio Amazonas, a influência dos balanços regionais de água, gases traço como CO₂, CH₄, N₂O e compostos orgânicos voláteis, ultrapassam os limites

da bacia e atuam como reguladores do clima global (RICHEY et al., 1990; HOUGHTON et al., 2000; MARENGO; NOBRE, 2001; RICHEY et al., 2002; DAVIDSON; ARTAXO, 2004; MELACK et al., 2004; BETTS et al., 2008; DAVIDSON, NEPSTAD et al., 2008; NOBRE et al., 2009).

A suspeita de que as florestas tropicais da Amazônia estariam acumulando uma enorme quantidade de carbono, até $6 \text{ t C hectare}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, (GRACE et al., 1995; MALHI et al., 1998; ARAUJO et al., 2002; CARSWELL et al., 2002) permitiria inferir que florestas tropicais seriam potenciais candidatas a resolver o desbalanço entre fontes e sumidouros globais de carbono, e que seu crescimento seria um efeito promovido pela fertilização do “carbono extra” presente na atmosfera.

No entanto, as estimativas de fluxo de carbono em florestas da Amazônia são bastante variáveis, sendo que alguns estudos mostram balanços neutros ou até mesmo positivos, ou seja, as florestas poderiam também atuar como fontes de carbono pra atmosfera (SALESKA et al., 2003; BAKER et al., 2004; MILLER et al., 2004). Em parte, a variabilidade nas estimativas se deve à localização das florestas estudadas e também às metodologias pelas as quais os balanços são calculados. Diferenças de umidade e nutrientes do solo, precipitação, relevo e cobertura de nuvens são tidos como fatores inerentes ao ecossistema que influenciam a ciclagem do carbono em florestas tropicais (OMETTO et al., 2005)

Resguardos estes fatores, o método usado para o cálculo da estimativa também pode ser a causa da variação no balanço de carbono. Um dos métodos mais avançados para medidas de fluxo de carbono em florestas baseia-se no uso de torres que permitem calcular os fluxos de carbono da floresta a partir da combinação de medidas dos vórtices turbulentos na atmosfera logo acima do dossel e de perfis verticais da concentração de CO_2 (BALDOCCHI et al., 1986).

No entanto, em condições com baixa velocidade do vento, muito comuns durante a noite na Amazônia; esse método pode eventualmente superestimar o consumo de CO_2 pela floresta. Razão pela qual se faz necessária a correção dos balanços que por sua vez é feita através da exclusão das medidas tomadas em noites calmas (ACEVEDO et al., 2004; MARTENS et al., 2004; MILLER et al., 2004).

As grandes incertezas observadas mostram que não se tem ainda informação suficiente para afirmar que a Amazônia seja uma fonte ou sumidouro de carbono. Sugerem ainda a existência de uma enorme variabilidade espacial nas florestas tropicais da Amazônia e que as estimativas de fluxos de carbono devem combinar

medidas de biomassa com a variabilidade climática interanual o que resultará numa maior acurácia nessas estimativas.

No que diz respeito a outros gases como o metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O), os balanços regionais podem ser ainda mais imprecisos, devido ao pouco esforço empregado no desenvolvimento de novas tecnologias de medidas e principalmente, devido ao reduzido número de estudos em florestas tropicais.

Especificamente no caso do metano, o papel das florestas tropicais assumiu grande destaque após a publicação de Keppler et al., (2006) mostrando que este gás poderia ser produzido diretamente pelas folhas das plantas vivas e mortas sob condições aeróbicas, processo de produção este nunca observado até então. Esta publicação causou grande surpresa e de certo modo, descontentamento da comunidade científica, não somente por ter mostrado uma importante fonte de metano e um processo de produção para os quais não se havia dado nenhuma atenção, mas também pela grandeza das estimativas que totalizariam em média $152,2 \text{ Tg ano}^{-1}$. Desse total, 12,7% seriam emissões provenientes de florestas tropicais.

Ainda que medidas indiretas mostrem que na Amazônia ocorram altas concentrações de metano na atmosfera sobre as florestas (FRANKENBERG et al., 2005), medidas diretas que possam corroborar essas observações são ainda incipientes. Carmo et al. (2006) usando um modelo que combina medidas diretas da concentração de metano em perfis verticais de florestas de terra-firme da Amazônia e medidas de fluxo de CO_2 do solo, estimaram que a emissão líquida de CH_4 varia entre 2 e $21 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, ou seja, a estimativa superior é uma ordem de grandeza maior que a estimativa inferior, o que mostra que as incertezas sobre os balanços de CH_4 são muito altas e que precisam ser minimizadas.

Embora o entendimento do comportamento dos gases de efeito estufa na atmosfera, tenha aumentado circunstancialmente devido ao uso de novas técnicas de medida e ao aumento do número de estudos, ainda é preciso avançar em vários sentidos. Dois deles são: a melhor caracterização (quantitativa e qualitativa) das fontes e sumidouros desses gases nos ecossistemas; e no sentido de encontrar alternativas viáveis do ponto de vista da precisão das medidas, e do ponto de vista financeiro, o uso de técnicas economicamente viáveis, o que possibilitaria o aumento do número de estudos.

Neste contexto, este trabalho pretende determinar o papel das florestas de terra-firme da Amazônia no balanço regional de CH_4 através da análise da composição isotópica desse gás para discriminar suas possíveis fontes no ecossistema. Em seguida, o trabalho mostrará o avanço na aplicação das medidas da atividade e do fluxo de Radônio-222 em áreas de floresta de terra-firme, bem como, a possível utilização deste como traçador indireto dos balanços de CH_4 nestas áreas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFIA

2.1 Metano e suas vias de produção

O metano (CH_4) é o gás traço mais abundante na atmosfera. É produzido, fundamentalmente sob condições de anaerobiose, por bactérias metanogênicas encontradas em áreas alagadas, em ecossistemas sedimentares e no trato digestivo de cupins e de alguns organismos ruminantes. A produção de CH_4 ocorre por meio de duas vias metanogênicas principais que são: a fermentação do acetato (CH_3COOH) e a redução do dióxido de carbono com o hidrogênio como fonte de elétron (CO_2/H_2) (MARTENS et al., 1986; WHITICAR et al., 1986; SUGIMOTO; WADA, 1995). O CH_4 também pode ser produzido através da queima incompleta de combustível fóssil e biomassa vegetal.

Contrariamente ao estabelecido pela comunidade científica, o trabalho publicado por Keppler et al. (2006) mostrou ser possível a produção efetiva de CH_4 em laboratório sob condições aeróbicas a partir de folhas vivas e mortas. Este trabalho foi duramente questionado quanto ao método apresentado para a extrapolação das estimativas de CH_4 e também quanto à validade do controle experimental (HOUWELING et al., 2006; KIRSCHBAUM et al., 2006; BUTENHOFF; KHALIL, 2007; KIRSCHBAUM; WALCROFT, 2008). Recentemente, outros trabalhos mostraram que *in vitro* folhas secas e frescas, assim como outras estruturas da planta, emitem quantidades significativas de CH_4 sob irradiação de luz UV ou calor (VIGANO et al., 2008).

2.2 Fontes e sumidouros de metano

Nos últimos três séculos, a concentração de CH_4 na atmosfera aumentou de 700ppb, para mais de 1700ppb, níveis jamais observados nos últimos 420,000 anos da história da Terra. O CH_4 é atualmente responsável por cerca de 20% da forçante antropogênica climática dos gases de efeito estufa (WUEBBLES; HAYHOE, 2002; IPCC, 2007).

As principais fontes e sumidouros de CH_4 na atmosfera estão sumarizadas na Tabela 1. Nota-se que o balanço anual entre as estimativas das fontes e

sumidouros de CH₄ é negativo (-47 Mt), isso implicaria no decréscimo das concentrações na atmosfera. No entanto, o que se observa é uma tendência contrária, de aumento da concentração deste gás na atmosfera nos últimos séculos.

A Tabela 1 também apresenta os valores extremos da contribuição das fontes individuais e dos sumidouros de CH₄. A variação observada mostra que o balanço entre fontes e sumidouros pode ser também positivo (+140 Mt), o que por sua vez condiz com o aumento da concentração de CH₄ observado na atmosfera.

Tabela 1 – Estimativas globais e variação das estimativas para fontes e sumidouros de CH₄. Adaptado de Lowe (2006)

Classe	Item	Estimativas	Variação das estimativas
Fontes de CH ₄	Áreas alagadas	145	92 a 237
	Agricultura de arroz	60	40 a 100
	Animais ruminantes	93	80 a 115
	Cupins	20	20 a 20
	Queima de biomassa	52	23 a 55
	Geração de energia	95	75 a 100
	Lixões	50	35 a 73
	Oceanos	10	10 a 15
	Hidratos (marino e terrestre)	5	5 a 10
Total das fontes de CH₄		530	500 a 600
Sumidouros de CH ₄	Oxidação na troposfera	507	450 a 510
	Perdas na estratosfera	40	40 a 46
	Oxidação pelos solos	30	10 a 44
Total dos sumidouros CH₄		577	460 a 580
Balanço entre fontes e sumidouros		-47	-80 a +140

*Valores em milhões de toneladas de CH₄ por ano

2.3 Fontes do CH₄ emitido no Brasil

Recentemente, o Ministério de Ciência e Tecnologia divulgou os resultados preliminares das emissões e remoções antrópicas de três importantes gases de efeito estufa no Brasil (CO₂, CH₄ e N₂O), sumarizadas na Tabela 2. Embora ainda preliminares, os resultados indicam que em 2005, a somatória das emissões desses gases no Brasil (2.199 Mt CO₂-equivalente) foi aproximadamente 62% maior em relação ao ano de 1990 (1.358 Mt CO₂-equivalente).

Outro levantamento das emissões brasileiras de CO₂, CH₄ e N₂O de procedência antrópica, publicado por Cerri et al. (2009), destaca que o aumento observado em 2005 (2.022 Mt CO₂-equivalente) em relação ao ano de 1990 (1.623 Mt CO₂-equivalente) foi de aproximadamente 25%. Os dados do trabalho de Cerri et al. estão sumarizados na Tabela 3. Os autores destacam ainda nessa revisão que o setor de mudanças no uso da terra é o principal contribuinte, contabilizando em média por 70% de todas as emissões. É importante notar que o CH₄ representa em torno de 16% do total das emissões antrópicas.

Quanto às emissões naturais, o Brasil também assume papel importante no cenário global, já que o país detém imensas áreas alagadas localizadas principalmente na Bacia Amazônica e no Pantanal. Melack et al. (2004) estimaram indiretamente que as emissões de CH₄ nas áreas alagáveis da bacia do Rio Amazonas varia em torno de 22 Tg C ano⁻¹ o que representa um potencial de aquecimento de aproximadamente 0,5 PgC na forma de CO₂.

Além das áreas alagadas, as florestas de terra-firme da Amazônia também podem contribuir substancialmente para emissões nacionais de CH₄. Carmo et al. (2006) apresentaram uma estimativa para emissão de líquida de CH₄ em florestas de terra-firme da Amazônia variando entre 4 e 38 Tg CH₄ ano⁻¹. Ainda que se considere somente o menor valor dessa estimativa, a contribuição da Amazônia equivale a aproximadamente 1% das emissões globais de CH₄.

Tabela 2 – Sumário das emissões e remoções antrópicas de gases de efeito estufa (GEE)

Gás/Setor	1990	1994	2000	2005	Variação	Contribuição	Contribuição
	----- (Gg) -----				1990/2005	1990	2005
----- (%) -----							
Emissões e remoções de CO₂							
Energia ¹	203.217	245.672	316.451	346.990	71	21,8	22,0
Processos industriais ²	19.456	19.038	26.235	25.438	31	2,1	1,6
Mudança no uso da terra	709.073	747.785	1.183.081	1.202.134	70	76,1	76,3
Total	931.746	1.012.496	1.525.767	1.574.562	69	100,0	100,0
Emissões e remoções de CH₄							
Energia ³	425	379	416	546	28	3,3	2,9
Processos Industriais (ind. química)	3	3	4	4	59	0,0	0,0
Agropecuária ⁴	9.869	10.571	11.144	13.465	36	75,6	71,0
Mudança no uso da terra e florestal	1.615	1.805	2.762	2.843	76	12,4	15,0
Tratamento de resíduos ⁵	1.146	1.333	1.739	2.113	84	8,8	11,1
Total	13.059	14.092	16.065	18.972	45	100,0	100,0
Emissões e remoções de N₂O							
Energia (queima de combustíveis) ⁶	8,9	8,9	9,4	11,5	29	1,8	1,6
Processos Industriais (ind. química) ⁷	10,3	16,2	19,6	22,6	120	2,1	3,1
Agropecuária ⁸	449,7	504,6	540,0	660,1	47	91,5	90,6
Mudança no uso da terra e florestas	11,1	12,4	19,0	19,5	76	2,3	2,7
Trat. de resíduos (esgoto doméstico)	11,6	12,3	13,6	14,7	27	2,4	2,0
Total	491,6	554,3	601,5	728,5	48	100,0	100,0

Fonte: Ministério da Ciência e Tecnologia (BRASIL, 2009). Obs: Dados preliminares, disponíveis em: www.mct.gov.br/upd_blob/0207/207624.pdf

¹ Queima de combustíveis fósseis: Subsetor energético, Subsetor industrial (indústria siderúrgica, química e outras indústrias), Subsetor transporte (aéreo, rodoviário e outros meios de transporte), Subsetor residencial, Subsetor agricultura, Outros setores; Emissões fugitivas: mineração de carvão, extração de petróleo e gás natural

² Produção de cimento, Produção de cal, Produção de amônia, Produção de alumínio, Outras indústrias

³ Queima de combustíveis: Subsetor energético, Subsetor industrial (indústria siderúrgica e outras indústrias), Subsetor transporte (rodoviário), Subsetor residencial, Outros setores; Emissões fugitivas: Mineração de carvão, Extração e transporte de petróleo e gás natural

⁴ Fermentação entérica: Gado bovino (gado de leite, gado de corte), Outros animais; Manejo de dejetos de animais: Gado bovino (gado de leite e gado de corte), Suínos, Aves, Outros animais; Cultura de arroz, Queima de resíduos agrícolas

⁵ Lixo, Esgoto (industrial, doméstico)

⁶ Subsetor industrial, Outros setores

⁷ Produção de ácido nítrico, Produção de ácido adípico

⁸ Manejo de dejetos de animais: Gado bovino, Outros animais; Solos agrícolas: Animais em pastagens, Fertilizantes sintéticos, Dejetos de animais, Fixação biológica, Resíduos agrícolas, Solos orgânicos, Emissões indiretas; Queima de resíduos agrícolas

Tabela 3 – Emissões de gases de efeito estufa para o período de 1990-2005

Gás/Setor	1990	1994	2000	2005	Variação	Contribuição	Contribuição
	------(Mt CO ₂ -eq)-----				1990/2005	1990	2005
					------(%)-----		
Emissões e remoções de CO₂							
Energia ⁹	203,4	236,5	321,2	341,6	68	17	23
Processos industriais ¹⁰	16,9	16,9	28,1	28,9	71	1	2
Agricultura	-	-	-	-	-	-	-
Mudança no uso da terra e florestal ¹¹	992,7	1.027,5	1.071,4	1.091,2	10	82	75
Esgoto	-	-	-	-	-	-	-
Total	1.213,0	1,280,9	1.420,7	1.461,7	21	100	100
Emissões e remoções de CH₄							
Energia ¹²	9,2	8,4	7,9	9,7	5	4	3
Processos Industriais	0,1	0,1	0,1	0,1	0	0	0
Agricultura ¹³	199,6	213,4	219,3	265,3	33	77	78
Mudança no uso da terra e florestal	33,9	37,9	43,9	43,8	29	13	13
Esgoto	15,5	16,9	18,9	20,7	34	6	6
Total	258,3	276,6	290,2	339,5	31	100	100
Emissões e remoções de N₂O							
Energia ¹⁴	2,5	2,8	3,0	3,0	20	2	1
Processos Industriais	2,5	4,3	6,0	8,0	220	2	4
Agricultura ¹⁵	139,8	155,9	163,1	202,2	45	92	91
Mudança no uso da terra e florestal	3,4	3,7	4,4	4,4	29	2	2
Esgoto	3,7	3,7	3,7	3,7	0	2	2
Total	151,9	170,5	180,2	221,2	46	100	100

Fonte: Cerri et al. (2009)

⁹ Queima de combustíveis fósseis, Emissões fugitivas

¹⁰ Produção de cimento, Outras indústrias

¹¹ Conversão de floresta e pastagem; Emissão e consumo pelos solos

¹² Queima de combustíveis fósseis, Emissões fugitivas

¹³ Fermentação entérica; Estrume; Cultivo de arroz; Queima de resíduos agrícolas

¹⁴ Queima de combustíveis fósseis

¹⁵ Estrume; Queima de resíduos agrícolas, Solos agrícolas

2.4 Uso de isótopos estáveis no estudo de metano

O conhecimento sobre a composição isotópica do CH₄ emitido tanto por fontes naturais quanto por fontes antropogênicas pode ser usado para o estabelecimento do balanço global desse gás (CHANTON et al., 2004). A informação dada pela técnica isotópica ajuda no entendimento da distribuição do CH₄, bem como, da importância dos processos de produção e remoção na ciclagem atmosférica (ANDERSEN, 1996; CONNY; CURRIE, 1996; QUAY et al., 1999; MILLER; TANS, 2003; MILLER et al., 2003).

O $\delta^{13}\text{C}$ do metano atmosférico depende da proporção de CH₄ proveniente das diferentes fontes (biogênica, pirogênica e antropogênica) e do efeito dos processos de consumo sobre estas fontes. O valor ponderado global de todas as fontes de CH₄ é empobrecido em ¹³C em relação ao valor médio global de $\delta^{13}\text{C}$ do CH₄ atmosférico, que por sua vez varia entre -47,3‰ e -46,2‰ (STEVENS; RUST, 1982; MILLER et al., 2002). Essa diferença se deve ao efeito cinético da reação do CH₄ com o radical hidroxila que preferencialmente remove da atmosfera o ¹²C com um fracionamento de pelo menos 1,0054 (CANTRELL et al., 1990).

Estudos da composição isotópica de gases traço na atmosfera fornecem informações que auxiliam no entendimento da distribuição desses gases, bem como, da importância dos processos de produção e remoção na ciclagem atmosférica (BRENNINKMEIJER et al., 1995; ANDERSEN, 1996; CONNY; CURRIE, 1996; QUAY et al., 1999; MILLER; TANS, 2003; MILLER et al., 2003). Em adição, diferenças na composição isotópica das fontes e na distribuição espacial e temporal das fontes desses gases ajudam a determinar o balanço global dos gases traço na atmosfera (CONNY; CURRIE, 1996). A composição isotópica pode ser utilizada para diferenciar o CH₄ proveniente de fontes biogênicas (empobrecidos em ¹³C em relação ao CH₄ atmosférico) do CH₄ de outras fontes, como gás natural e queima de biomassa (enriquecidos em ¹³C) (WUEBBLES; HAYHOE, 2002).

Segundo Miller (2004), o entendimento dos efeitos do fracionamento isotópico durante a produção e o consumo do CH₄ permite fazer o contraste entre as fontes e sumidouros no balanço global de gás. Medidas da composição isotópica das fontes individuais de CH₄ no ato da produção e do ar na troposfera podem reduzir as incertezas sobre o balanço atmosférico, e ainda, ajudar no entendimento dos processos envolvidos durante a produção e o consumo desse gás (MARIK et al.,

2002). A Tabela 4 mostra os valores compilados por Lassey et al. (2000), da composição isotópica de CH₄ e as estimativas das emissões globais de fontes naturais e antropogênicas desse gás, comparando dois cenários (por volta de 1700 e 1990). Os dados mostram que as emissões naturais decresceram ligeiramente (-15 Tg ano⁻¹), enquanto que as emissões antrópicas aumentaram espantosamente desde o período pré-industrial (+352 Tg ano⁻¹). Este aumento teve um efeito significativo na composição isotópica do CH₄ que ficou enriquecido em ¹³C em pelo menos 5‰ em relação ao CH₄ emitido no pré-industrial.

Tabela 4 – Cenários de inventários globais de fontes naturais e antropogênicas e composição isotópica ($\delta^{13}\text{C}$) de metano. Adaptado de Lassey et al. (2000)

Fontes	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	Fonte (Tg ano ⁻¹)	
		Por volta de 1700	Por volta de 1990
<i>Natural</i>			
Áreas alagadas	-60	135	130
Cupins	-62	20	20
Animais selvagens	-63	15	5
Oceanos	-40	10	10
Geológico	-40	5	5
Incêndios boreais	-25	2,5	2,5
Incêndios naturais em Savanas	-12	2,5	2,5
Subtotal		190	175
<i>Antropogênica</i>			
Fóssil	-40	0	100
Fermentação entérica	-63	5	85
Agricultura Irrigada	-57	13	60
Queima de floresta	-25	3	38
Queima de áreas de savanas	-12	2	2
Aterros sanitários	-52	0	40
Esgotos	-58	0	50
Subtotal		23	375
Total (por volta de 1700)	-57,0	213	
Total (por volta de 1990)	-52,3		550
Fontes suplementares	-49,4		337

2.5 Radônio (^{222}Rn) e decaimento radioativo

O Radônio (^{222}Rn) é um gás nobre, radioativo, incolor, inodoro e quimicamente inativo que se origina do Urânio-238 (isótopo do Urânio), o qual ocorre naturalmente em vários níveis na maioria dos tipos de granito e solos (LEDERER et al., 1968). É produzido de forma natural e contínua em rochas e solos e sua meia-vida é de 3,82 dias (LEDERER et al., 1968; TRUMBORE et al., 1990; MANCINI; BONOTTO, 2002).

O Urânio presente nos minerais da crosta terrestre é radioativo e apresenta meia vida longa. O decaimento radioativo do Urânio gera uma série radioativa que envolve vários outros elementos. Os átomos de ^{222}Rn são formados diretamente pelo decaimento ^{226}Ra como parte do processo de decaimento do Urânio (^{238}U) até o estado estável do Chumbo (^{206}Pb), processo este que envolve desintegrações alfa e gama (Figura 1).

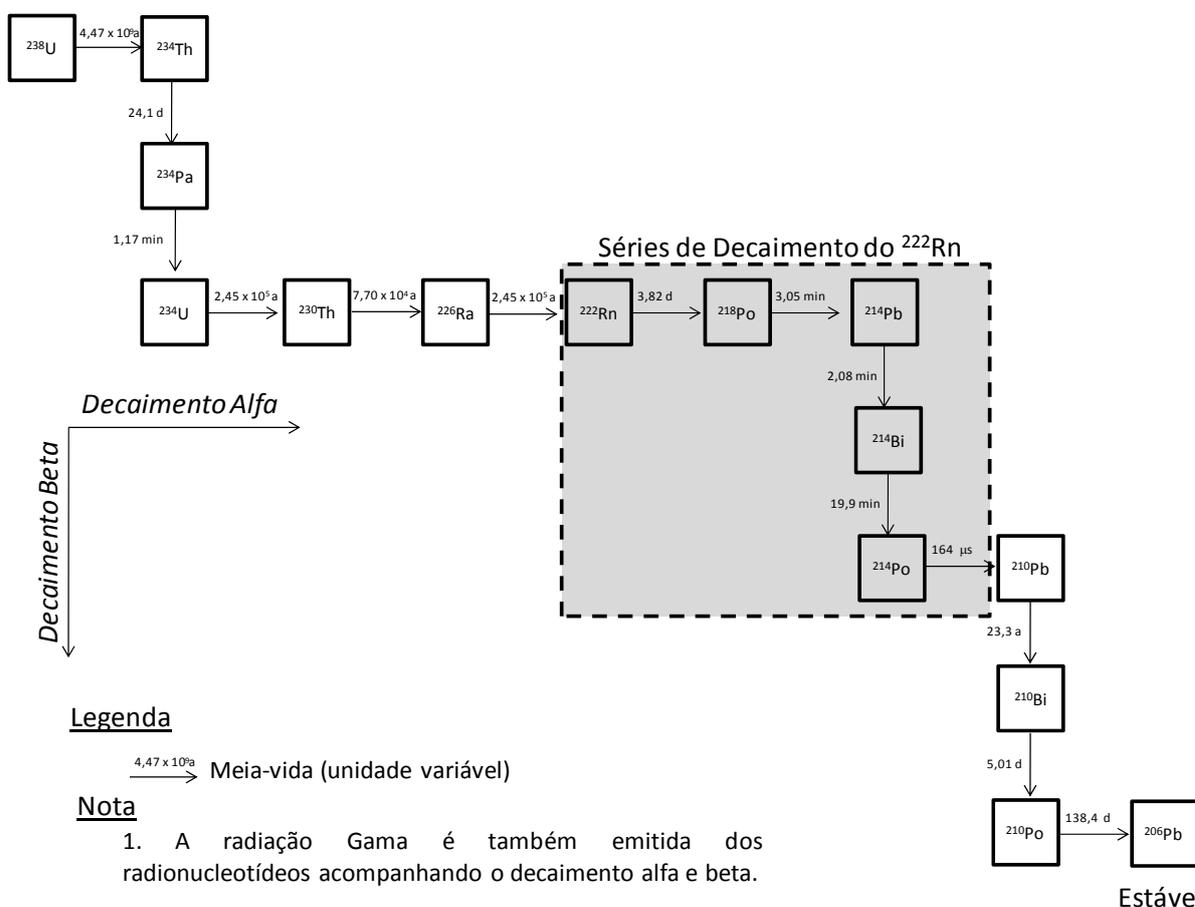


Figura 1 - Séries de decaimento alfa e beta do Urânio-238. Em cinza, destaque para as séries de decaimento do ^{222}Rn . Adaptado de Lederer et al. (1968)

Um dos campos de interesse nas investigações sobre o Radônio é o da medicina, devido à associação entre casos de câncer de pulmão e altas concentrações de Radônio. Muitos trabalhos tem mostrado que em locais onde a concentração é muito alta, como as minas de carvão, por exemplo, o ^{222}Rn pode estar ligado ao aparecimento de câncer de pulmão (WILCOX et al., 2008; GRAY et al., 2009; VACQUIER et al., 2009). Ao serem inalados, o Radônio e seus produtos do decaimento radioativo, podem se depositar no epitélio bronquial expondo assim as células do epitélio à radiação alfa (AUVINEN; PERSHAGEN, 2009).

Desde a década de 80 muitas medidas de fluxo de ^{222}Rn do solo tem sido tem sido reportadas (Tabela 5). Alguns desses estudos objetivaram a determinação das taxas de fluxos em grandes áreas. Em outros casos as medidas de ^{222}Rn se limitaram a poucos locais de coleta ou eram apenas parte de experimentos com temática diferente (CONEN; ROBERTSON, 2002). Essas medidas diretas de fluxo apresentaram médias de fluxo similares, mas devido à grande variabilidade dos dados não é possível identificar uma tendência de aumento ou diminuição das taxas de emissão em um gradiente latitudinal.

Tabela 5 – Fluxos de ^{222}Rn de solos naturais. Adaptado de Conen e Robertson (2002)

País	Latitude	Fluxo de ^{222}Rn (atom $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Nº de amostras	N de sites amostrados	Escala temporal	Referência
Canadá	54°N	0,54	8	2	Jul + Ago	Ussier et al. (1994)
Canadá	50°N	0,33	51	51	Ago + Set	Kuhlmann et al. (1998)
Alemanha	50°N	0,08–0,19	11	6	^{a)}	Keller and Schiitz, 1988)
Alemanha	49°N	0,88	^{a)}	^{a)}	Média anual	Dörr et al. (1983)
Germany	49°N	0,75	>1000	5	Média de 8 anos	Schüßler (1996); cited in Levin et al. (1999)
Romênia	46°N	0,95	9	3	Out, Nov + Mar	Cosma et al. (1996)
Espanha	37°N	0,60	235	4	Jan, Fev, Jun + Out	Dueñas et al. (1997)
Japão	36°N	0,48	9	2	Jul–Out	Uchida et al. (1997)
Japão	35°N	0,48	^{a)}	13	Média anual	Tojo (1989); cited in Moriizumi et al. (1996)
Japão	35°N	0,41	^{b)}	1	Out, Dez + Jan	Koarashi et al. (2000)
EUA	26–31°N	0,70	882	882	Abr + Jun	Nielson et al. (1996)
Índia	15°N	1,43	13	13	^{a)}	Somashekarappa et al. (1996)
Brasil	3°S	0,38	20	8	Abril + Maio	Trumbore et al. (1990)
Austrália	11–39°S	1,05	–	–	Média anual	Schery et al. (1989)
Tasmânia	41– 44°S	1,20	78	78	Jun + Jul	Whittlestone et al. (1998)
		1,10	74	37	Feb + Jan	

^{a)} Dados não fornecidos no artigo.

^{b)} Medidas contínuas.

2.6 Uso do ^{222}Rn como traçador das taxas de troca entre o dossel de floresta e a atmosfera

Por ser emitido exclusivamente pelo solo e por ser um elemento inerte de meia-vida de igual 3,82 dias e ter como único sumidouro o seu próprio decaimento, o ^{222}Rn pode ser usado como traçador do transporte de gases tanto em ambientes terrestres como aquáticos.

As taxas de trocas de gases traço entre a biofera terrestre e atmosfera controlam importantes aspectos da química da troposfera e do potencial de oxidação que a atmosfera exerce sobre esses gases (MOONEY et al., 1987).

Na década de 60 se iniciaram os esforços na tentativa do uso de medidas ^{222}Rn como de traçador processos meteorológicos de superfície. Coeficientes de difusão usados na parametrização de taxas de troca na superfície podiam ser inferidos a partir de inventários da concentração de ^{222}Rn (JACOBI; ANDRE, 1963; LARSON; HOPPEL, 1973). O ^{222}Rn pode ser usado como traçador das estimativas de CO_2 e outros gases devido à similaridade entre suas taxas de fluxo e trocas com a atmosfera (KROMER; ROETHER, 1979; DORR et al., 1983; GAUDRY et al., 1988; ZAUCKER et al., 1996).

No entanto, a aplicação direta de ^{222}Rn como traçador de trocas gasosas em ambientes de floresta só ocorreu na década de 90 por Trumbore et al. (1990). Este estudo mostrou que as taxas de troca de CO_2 calculadas a partir do ^{222}Rn eram similares aquelas medidas por métodos convencionais, como balanços de energia (FAN et al., 1990; FITZJARRALD; MOORE, 1990).

Outros trabalhos seguiram com o uso de medidas contínuas de ^{222}Rn feitas com novos detectores e com o auxílio de torres de fluxo, o que aumentou a frequência das medidas e conseqüentemente, a confiabilidade das inferências das trocas gasosas (BUTTERWECK et al., 1994; USSLER et al., 1994). Recentemente, Martens et al. (2004) combinaram medidas de fluxo do solo e da concentração de Rn-222 ao longo do perfil vertical de floresta de terra-firme na Amazônia para inferir as taxas de trocas líquidas de CO_2 entre o dossel da floresta e atmosfera. As medidas foram realizadas simultaneamente às medidas feitas com a técnica de vórtices turbulentos (SALESKA et al., 2003). As taxas de trocas líquidas de CO_2 calculadas a partir das medidas de ^{222}Rn foram similares as taxas calculadas e corrigidas quanto ao viés das noites calmas, mostrando a viabilidade do uso das

medidas de ^{222}Rn para a determinação das taxas de trocas gasosas em florestas tropicais.

2.7 Inferência do fluxo de metano a partir de medidas diretas de ^{222}Rn

Alguns autores vem utilizando medidas de ^{222}Rn para calcular os fluxos de outros gases, entre estes o metano (CH_4). Levin et al. (1999), por exemplo, estimou as emissões totais de metano em uma bacia hidrográfica na Alemanha, utilizando correlações entre medidas de ^{222}Rn tomadas a cada 30 minutos, taxas de mistura de CH_4 de 1995 a 1997 e a média das emissões de ^{222}Rn de solos típicos da região, mostrando que os inventários de emissões nacionais, geralmente baseados em estatísticas e fatores de emissão, podem ser validados através de traçadores indiretos como o ^{222}Rn .

Dueñas et al. (1996), utilizou as medidas simultâneas de fluxo de radônio da superfície do solo em paralelo com a concentração de radônio no perfil do solo e a concentração de CH_4 no ar do solo, como método indireto para estimar os fluxos de metano de quatro diferentes tipos de solos na Espanha.

De modo similar, Moriizumi et al. (1996) estimou as emissões de CH_4 de áreas urbanas de Nagoya, no Japão adotando a concentração atmosférica do radônio como traçador natural. Este autor se baseou na premissa de que, assim como ocorre com o radônio, a variação diurna do metano é predominantemente afetada pela condição meteorológica local.

Visto que correlações positivas entre as concentrações destes dois gases são comumente observadas, o fluxo de CH_4 pode ser estimado a partir de medidas de ^{222}Rn . Moriizumi et al. (1996) inferiram o fluxo de CH_4 , com base na seguinte equação:

$$\frac{\Delta C_{\text{CH}_4}}{\Delta C_{\text{Rn}}} = \frac{E_{\text{CH}_4}}{E_{\text{Rn}}} \quad (1)$$

Onde:

ΔC_{CH_4} é variação da concentração de CH_4 ;

ΔC_{Rn} é a variação da concentração de ^{222}Rn ;

E_{CH_4} é o fluxo de metano na área estudada;

E_{Rn} é o fluxo de ^{222}Rn na área estudada.

3 VARIAÇÃO NA CONCENTRAÇÃO E COMPOSIÇÃO ISOTÓPICA DE METANO EM FLORESTAS DE TERRA-FIRME NA AMAZÔNIA ORIENTAL

RESUMO

O trabalho apresentou o primeiro conjunto de dados sobre a composição isotópica de metano ($\delta^{13}\text{CH}_4$) em áreas de floresta de terra-firme da Amazônia brasileira, e combinou medidas da concentração desse gás na tentativa de determinar suas possíveis fontes no ecossistema. As campanhas foram realizadas na Floresta Nacional do Tapajós (F.N.T.) e na Floresta Nacional de Caxiuanã (F.N.C.). Amostras de ar atmosférico foram coletadas no perfil vertical de floresta (0,2; 7,0; 15,0; 22,0; 35,0 e 45,0 m) em diferentes horas do dia (4:00, 12:00, 16:00, 22:00 e 24:00h) durante as estações chuvosa, intermediária e seca. As amostras de ar foram puxadas através de tubos por uma bomba e em seguida envasadas em frascos de vidro. O $\delta^{13}\text{CH}_4$ foi determinado por espectrometria de massa (Finnigan Mat 252 acoplado a um cromatógrafo gasoso (HP 5890 GC) e a uma interface de combustão de fluxo contínuo (CF/GCC/MS). A concentração foi determinada por cromatografia gasosa (Shimadzu 14A – Greenhouse). O $\delta^{13}\text{CH}_4$ variou de -49,46‰ a -46,00‰. O valor médio para todo o período amostrado foi igual a -47,51‰. A concentração variou entre 1,82ppmv e 2,75ppmv com média igual a 2,09ppmv. Ambos os sítios apresentaram variação sazonal no $\delta^{13}\text{CH}_4$ e na concentração, sendo mais empobrecidos em ^{13}C e menos concentrados na estação seca em relação à estação chuvosa. A variação espacial foi observada apenas para o $\delta^{13}\text{CH}_4$. A F.N.C. apresentou valor médio de $\delta^{13}\text{CH}_4$ mais empobrecido em ^{13}C que o encontrado na F.N.T.. Os valores levemente empobrecidos observados na floresta em relação ao CH_4 atmosférico sugerem que a produção microbiana pode ser uma fonte importante desse gás. No entanto, fontes diversas podem coexistir ao longo do perfil vertical e podem contribuir diferentemente para determinação da composição isotópica do CH_4 emitido.

Palavras-chave: metano, Amazônia, floresta tropical de terra-firme, efeito estufa, composição isotópica

VARIATION IN CONCENTRATION AND ISOTOPIC COMPOSITION OF METHANE IN UPLAND FORESTS OF EASTERN AMAZONIA

ABSTRACT

This work presents the first dataset about stable isotopic composition of CH₄ ($\delta^{13}\text{CH}_4$) collected in upland forests of the Brazilian Amazonia, and combines measurements of CH₄ concentration attempting to determine its possible sources in the ecosystem. The campaigns were carried out at the Tapajós National Forest (T.N.F) and Caxiuanã National Forest (C.N.F). Atmospheric air samples were collected in a vertical profile (0.2, 7.0, 15.0, 22.0, 35.0, and 45.0 m) in different times of the day (4:00, 12:00, 16:00, 22:00, and 24:00h) during the wet, intermediary, and dry season. The air samples were pulled through tubes by a battery-operated pump and then stored into glass flasks. The $\delta^{13}\text{CH}_4$ was determined by mass spectrometry (Finnigan Mat 252 equipped with HP 5890GC, interfaced to a CF/GCC/MS) and the concentration was determined by gas chromatography (Shimadzu 14A – Greenhouse). The $\delta^{13}\text{CH}_4$ varied from -49.46‰ to -46.00‰. The overall mean value found was equal to -47.51‰. The concentration varied from 1.82ppmv to 2.75ppmv, with overall mean equal to 2.09ppmv. Both sites showed seasonal variation in $\delta^{13}\text{CH}_4$ and concentration, being more depleted in ¹³C and more concentrated during the dry season compared to the wet season. A spatial variation was observed only for $\delta^{13}\text{CH}_4$. The C.N.F. showed a mean value of $\delta^{13}\text{CH}_4$ more depleted in ¹³C than the mean values measured at the T.N.F. The lightly depleted values observed in forest suggest that microbial production might be an important source of the gas, however, other sources with different origins could co-exist along the profile and could contribute differently to the isotopic composition of the CH₄ released.

Key-words: methane, Amazon, upland tropical forest, greenhouse effect, stable isotopic composition

3.1 Introdução

O metano (CH_4) é um dos mais importantes gases de efeito estufa e, devido ao aumento de sua concentração na atmosfera durante o último século, muitos estudos estão sendo desenvolvidos com o objetivo de descrever e entender seu comportamento na atmosfera. O CH_4 promove grande influência sobre o clima e sobre as condições químicas da atmosfera, sendo esta a principal causa da preocupação da comunidade científica quanto à sua alta taxa de aumento (WUEBBLES; HAYHOE, 2002). Devido sua reatividade, o CH_4 assume um papel importante na química da troposfera e estratosfera. O potencial de aquecimento da atmosfera exercido pelo CH_4 é 24,5 vezes maior que o do CO_2 que é um dos principais contribuintes para o efeito estufa (HOUGHTON, 1994). Além disso, o CH_4 atua como controlador dos níveis de outros gases, pois sua oxidação pelo radical hidroxila (OH) na presença de altos níveis de óxidos de nitrogênio (NO_x) leva à formação do formaldeído (CH_2O), ozônio (O_3), monóxido de carbono (CO), além de afetar as concentrações do vapor d'água na atmosfera (WUEBBLES; HAYHOE, 2002).

Os modelos atuais do balanço global de CH_4 contabilizam as contribuições de fontes naturais e antropogênicas, sendo que as naturais referem-se às emissões provenientes de áreas alagadas, cupins, ruminantes, oceanos e hidratos, enquanto que as fontes antropogênicas referem-se às emissões relacionadas com práticas agrícolas, a fermentação dos resíduos animais e humanos, queima de biomassa, e queima de combustíveis (KHALIL et al., 1993; JUDD et al., 2002; WUEBBLES; HAYHOE, 2002; DLUGOKENCKY et al., 2003). Esse grande número de fontes de metano, aliado a uma grande variabilidade nas estimativas de concentração e fluxo, resulta na dificuldade de extrapolar as poucas medidas obtidas a partir de estudos em sítios específicos para escalas globais (QUAY et al., 1988).

Fato óbvio é o aumento da concentração de CH_4 na atmosfera no último século, principalmente após a Revolução Industrial (PEARMAN; FRASER, 1988; STAUFFER et al., 1988; STEELE et al., 1992; ETHERIDGE et al., 1998; PETIT et al., 1999). Informações obtidas a partir do estudo de bolhas de ar conservadas em geleiras polares mostram que as concentrações atuais, cujos valores estão acima de 1700 ppbv (ETHERIDGE et al., 1998; DLUGOKENCKY et al., 2003), são as maiores em pelo menos 420 milhões de anos (PETIT et al., 1999).

Dados obtidos por torres meteorológicas em estudos de covariância de vórtices turbulentos (*Eddy Covariance*) têm mostrado que as florestas tropicais na Amazônia apresentam valores altos de concentração de CH₄ durante o período noturno. O aumento noturno da concentração de CH₄ e CO₂ no perfil vertical do dossel de floresta, observado em amostras provenientes de várias regiões da Amazônia durante as estações seca e chuvosa, fortalecem a hipótese de que durante a noite, ocorreria a produção de metano em microsítios anaeróbios, e que este se acumularia nos compartimentos do dossel da floresta (WOFSY et al., 1988; KUCK et al., 2000; MARTENS et al., 2004).

As altas taxas de precipitação, temperatura elevada e principalmente, os elevados índices de umidade relativa do ar, que chegam a 100% mesmo nos períodos de seca, proporcionam a condensação do vapor d'água no interior da floresta durante a noite. Na Floresta Nacional do Tapajós, por exemplo, a ocorrência de várias espécies de bromélias e árvores cujos troncos possibilitam o armazenamento de água (PAROTTA et al., 1995) podem fornecer condições de anaerobiose e por conseqüência, permitir a decomposição de matéria orgânica e produção de metano.

Para melhor prever o futuro do metano na atmosfera é preciso não apenas reunir medidas de fluxo das atuais fontes de metano, mas, compreender os mecanismos que contribuem para sua produção e emissão (KELLER; STALLARD, 1994). Neste contexto, o uso da metodologia isotópica para determinação das fontes do metano gerado em florestas tropicais pode contribuir para o conhecimento do papel desses ecossistemas no balanço regional e global do metano.

O principal objetivo deste trabalho é utilizar medidas da composição isotópica do metano ($\delta^{13}\text{CH}_4$) emitido em áreas de floresta primária com diferentes regimes de pluviosidade, para determinar as possíveis fontes desse gás através da relação entre o $\delta^{13}\text{CH}_4$, sua concentração e a variação no fluxo. Para isso, foram analisadas a composição isotópica do metano em amostras de ar coletadas em perfis verticais em florestas de terra-firme, incluindo o compartimento próximo ao solo, sub-bosque, dossel e na atmosfera logo acima deste.

A hipótese deste trabalho é que, de modo similar ao $\delta^{13}\text{CH}_4$ atmosférico, o $\delta^{13}\text{CH}_4$ no perfil vertical da floresta deverá refletir o balanço entre a produção e o consumo do gás nesse compartimento, bem como, refletirá os processos pelos

quais o gás é produzido. Desta forma, a ocorrência de valores de $\delta^{13}\text{C}$ mais leves que o metano atmosférico indicará que no período noturno, quando ocorre um acúmulo desse gás no dossel da floresta, a produção microbiana consiste na principal fonte.

3.2 Material e métodos

3.2.1 Áreas de estudo

O trabalho foi realizado em duas reservas nacionais de floresta tropical, Floresta Nacional de Caxiuanã (F.N.C.) e Floresta Nacional do Tapajós (F.N.T.). Ambas estão localizadas na porção oriental da Amazônia brasileira, no Estado do Pará (Figura 2-A). Em cada uma das reservas existe uma torre metálica que permite o acesso ao dossel da floresta.

3.2.1.1 Floresta de terra-firme na Flona Caxiuanã

A Floresta Nacional de Caxiuanã (F.N.C.), 01° 42' 59,7"S; 51° 27' 45,1"O, localiza-se na região nordeste do Estado do Pará (Figura 2 -B). Esta reserva ocupa uma área de 33.000 ha a 350 km de Belém-PA e a 100 km da estação meteorológica de Breves-PA (SANTOS et al., 2002). Nesta área as amostras foram coletadas em uma torre de alumínio retangular (2x1m) de 51,5 m de altura (CARSWELL et al., 2002).

A F.N.C. apresenta diferentes fisionomias vegetais dentre as quais se destacam: A floresta densa de terra-firme, floresta de inundação (várzea e igapó), vegetação secundária (capoeira) e savanas, além de vegetação residual de sítios de pomares (LISBOA et al., 1997). Contudo, o ambiente mais extenso da reserva e predominante no entorno da torre é a floresta densa de terra-firme (Figura 2 -C).

A região de Caxiuanã apresenta clima tropical quente e úmido do tipo *Ami* segundo a classificação de Köppen, marcado por um período de intensa precipitação nos primeiros meses do ano, e por um período de seca nos meses de julho a novembro. A temperatura média anual varia em torno de 26 °C.

Na Floresta Nacional de Caxiuanã predominam os LATOSSOLOS AMARELO, apresentando boa drenagem e baixa fertilidade. Ao redor da torre o solo é classificado como LATOSSOLO AMARELO Distrófico típico, com textura muito argilosa, oriundo de arenitos e argilitos cauliniticos (RADAMBRASIL, 1974; COSTA, 2002).

O relevo regional, assim como aquele onde a torre de fluxo está localizada, é plano e suavemente ondulado. Os terrenos desenvolveram-se sobre sedimentos da Formação Alter do Chão, no Período Cretáceo e são comuns da unidade morfoestrutural dos planaltos rebaixado do Amazonas e do domínio morfoclimático dos planaltos amazônicos rebaixados ou dissecados das áreas colinosas e planícies revestidas por floresta (RADAMBRASIL, 1974; COSTA, 2002). As altitudes na área de maior influência ao redor da torre de fluxo (raio de 10 km) variam entre 1 e 75 m em relação ao nível do mar, sendo que apenas 27% dessa área (~84 km²) apresenta altitudes maiores que 50 metros (Figura 2-C).

3.2.1.2 Floresta de terra-firme na Flona Tapajós

O sítio de coleta está localizado na Floresta Nacional do Tapajós (F.N.T.), próximo ao município de Belterra-PA (1° 43' 30,04"S; 51° 27' 23,46"O) e dispõe de uma torre de 45 metros que permite o acesso ao dossel da floresta (Figura 2-B). Detalhes da estrutura da torre de fluxo usada neste local podem ser encontrados nos trabalhos de Domingues et al. (2005) e Ometto et al. (2002; 2005).

A vegetação predominante no entorno da torre e no restante da F.N.T. é a floresta de terra-firme, do tipo ombrófila densa (de baixas altitudes e/ou submontanas), composta de vegetação com altura do dossel variando entre 30-35 m e algumas árvores alcançando 40-45 m. As espécies predominantes desse tipo de floresta incluem: Sucupira (*Diplotropis* sp.), Acariquara (*Minuartia guianensis* Aubl.), Castanheira (*Bertholletia excelsa* H.B.K.), Cupiúba (*Goupia glabra* Aubl.). Muiraúba (*Mouriria brevipes* Gard in Hook), Itaúba (*Mezilaurus itauba* (Meiss) Taub ex Mez.), Mandioqueiras (*Qualea* sp.) e Maçaranduba (*Manilkara huberi* (Ducke) Standl). Todavia, outras fisionomias são comumente observadas na F.N.T., como por exemplo, as florestas tropicais abertas, que geralmente ocorrem nos platôs intensamente dissecados com erosão nos declives, vales estreitos e solos com textura média. Esta fisionomia é caracterizada pela presença de florestas com lianas e várias espécies de palmeiras como Açaí (*Euterpe oleracea* Mart.) e Babaçu (*Orbignya phalerata* Mart.) (RADAMBRASIL, 1976; INPE, 1992; PAROTTA et al., 1995).

Na F.N.T. também predominam os LATOSSOLOS AMARELO Distrófico, caracterizado por diferentes texturas, com predomínio de argila, principalmente nas áreas de platô onde as torres de fluxo estão localizadas (SILVER et al., 2000; NEPSTAD et al., 2002; TELLES et al., 2004). Ocorrem também variações desta unidade, dentre as quais se destacam os LATOSSOLOS AMARELO Distrófico Plíntico, de textura média e argilosa. Associados à estas classes, são encontrados os solos PLINTOSSOLOS PÉTRICOS, concrecionários, de textura indeterminada e o NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Órtico. Os ARGISSOLOS VERMELHO-AMARELO também ocorrem na F.N.T., sendo encontrados em relevo plano a fortemente ondulado (RADAMBRASIL, 1976; PAROTTA et al., 1995; ESPÍRITO-SANTO, 2003).

A F.N.T. situa-se na unidade morfoestrutural Planalto Tapajós-Xingu, a qual apresenta cotas altimétricas variando de 1 m a altitudes acima de 200 m, relevos dissecados com a forma tabular, drenagem adensada com insipiência de afundamento e a formação de lagoas. A F.N.T. apresenta três ambientes geológicos bem distintos: o alto platô; com um relevo mais plano na porção norte e centro da reserva, o baixo platô; com um relevo bem homogêneo nas proximidades do rio Tapajós, e o baixo platô; de relevo dissecado (escarpas) na porção sul da F.N.T. (RADAMBRASIL, 1976; INPE, 1992; TORRES, 2000; ESPÍRITO-SANTO, 2003). A torre usada para as coletas de ar atmosférico localiza-se no alto platô (Figura 2-C).

Na F.N.T., em um raio de 10 km do local onde a torre de fluxo está instalada, as altitudes variam entre 1 e 209m, sendo que a maior parte dessa área (~97%) apresenta altitudes acima de 50 metros (Figura 2-C). Segundo a classificação de Köppen, o clima na F.N.T. é do tipo *Ami* (clima megatérmico, tropical úmido), com temperatura média do mês mais frio acima dos 18°C e com estação seca sob influência das monções (PEREIRA et al., 2002).

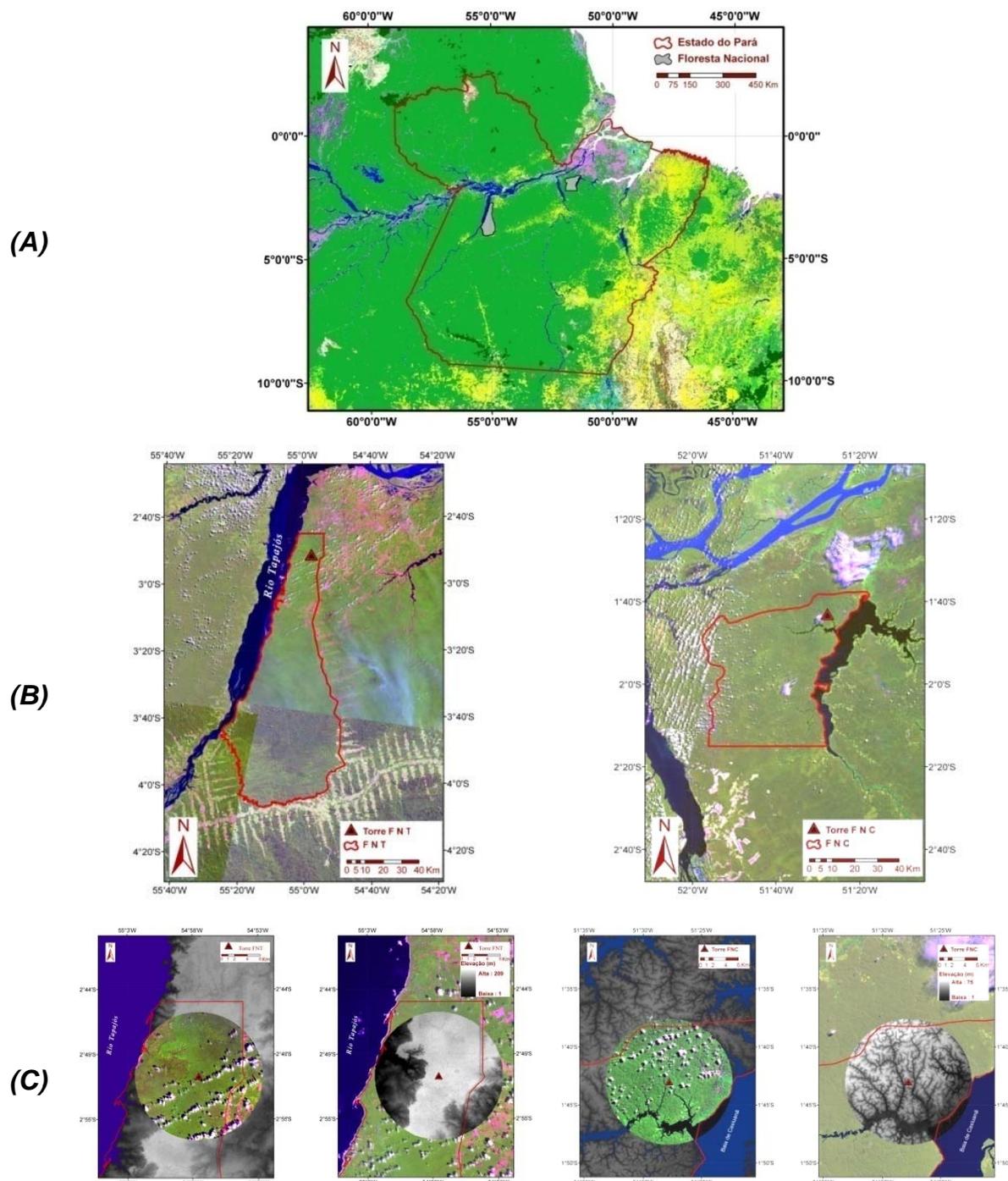


Figura 2 – Localização das áreas de estudo no estado do Pará (A)¹⁶. Visualização das Florestas Nacionais do Tapajós (F.N.T.) e Caxiuanã (F.N.C.) e das torres de fluxo usadas para coletas das amostras (B)¹⁷. Detalhes da cobertura vegetal e do relevo em um raio de 10 km ao redor de cada torre (C)¹⁸

¹⁶ Mapa do Estado do Pará sobreposto ao mapa de vegetação. Detalhes em Eva et al. (2004);

¹⁷ Unidades de conservação (UC): Os contornos das UCs foram sobrepostos às imagens ETM+/Landsat na composição RGB (543);

¹⁸ Cobertura vegetal: Recorte dos mosaicos de imagens ETM+/Landsat sobreposto aos mapas de elevação do terreno (SRTM). Disponível em: <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>

3.2.1.3 Regimes pluviométricos

A precipitação média anual na região da F. N. C é de 2296 mm ano⁻¹, sendo que a estação seca é mais pronunciada nos meses de agosto a novembro (Figura 3-A). Já na F. N. T a precipitação anual varia em torno de 2.200 mm ano⁻¹, com estação seca (menos de 100 mm por mês) entre os meses de julho e novembro (Figura 3-B).

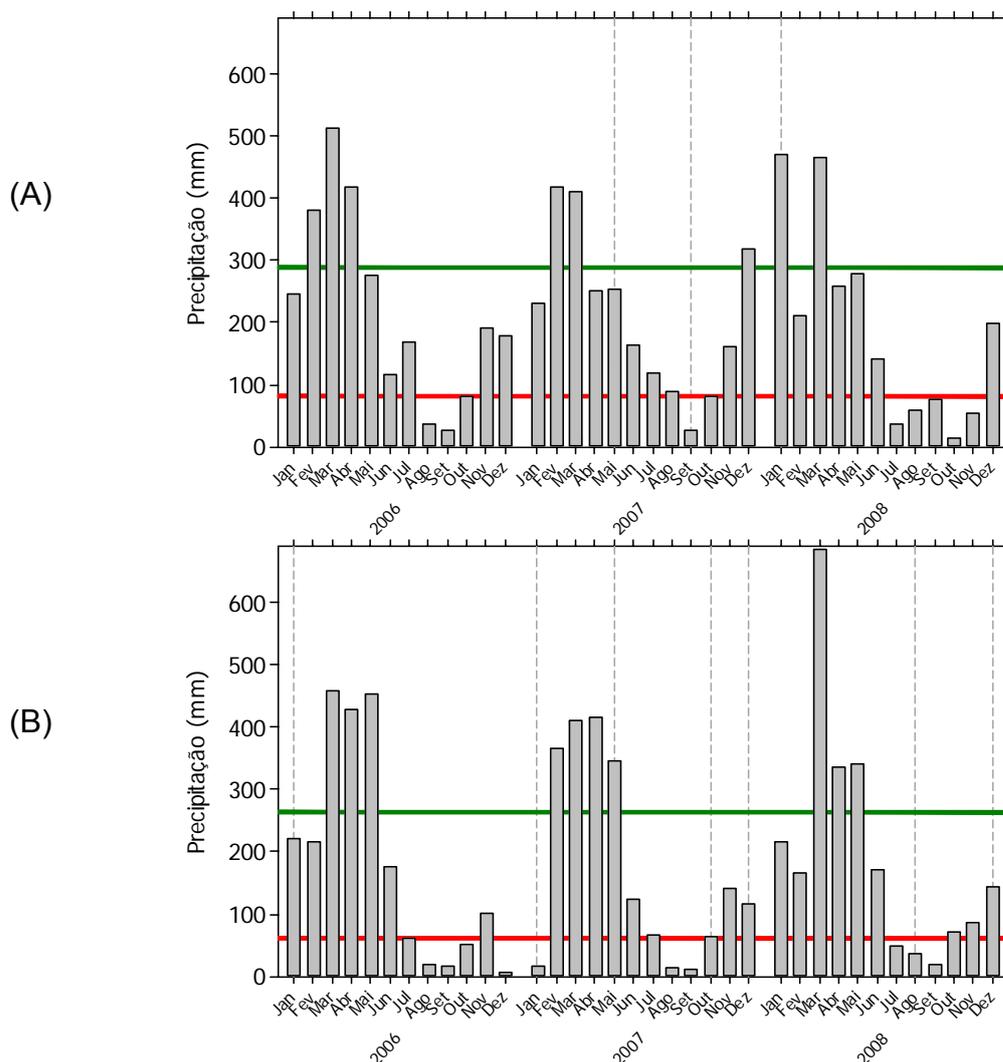


Figura 3 - Média mensal de precipitação nos municípios de Breves-PA (A) e em Belterra-PA (B)¹⁹. As linhas verticais tracejadas indicam o período de cada coleta. As linhas horizontais vermelhas indicam o limite entre as estações seca e intermediária e as linhas verdes indicam o limite entre a estação intermediária e chuvosa²⁰

¹⁹ Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em: www.inmet.gov.br/sim/sonabra/convencionais.php

²⁰ F. N. C.: Limite Estação Seca $\leq 82,65$ mm; Limite Estação Chuvosa $\geq 287,96$ mm

F. N. T.: Limite Estação Seca $\leq 62,10$ mm; Limite Estação Chuvosa $\geq 263,67$ mm

Os limites entre as estações foram definidos com base na distribuição dos valores médios mensais de precipitação observados no período entre 2000 e 2008. Desta forma, o valor igual ao primeiro quartil (25%) da distribuição da chuva em cada estação representa o limite entre a estação seca e intermediária, e o valor igual ao quarto quartil (75%) da distribuição representa o limite entre a estação intermediária e a chuvosa.

Nota-se que, embora o regime de chuvas observado para as duas florestas estudadas seja similar, o volume de precipitação observado na Floresta Nacional de Caxiuanã, no período entre 2006 e 2008, é pelo menos 10% maior que o observado na Floresta Nacional do Tapajós.

Comparando-se apenas o volume médio precipitado em cada uma das estações em que houve amostragem, observa-se que o volume precipitado na Floresta Nacional de Caxiuanã, durante as estações chuvosa e intermediária, foi 27% e 43%, respectivamente, maior que o volume precipitado na Floresta Nacional do Tapajós durante as mesmas estações. O inverso é observado durante a estação seca visto que o volume precipitado na Floresta Nacional do Tapajós foi maior (46%) que o volume precipitado na Floresta Nacional de Caxiuanã (Figura 4).

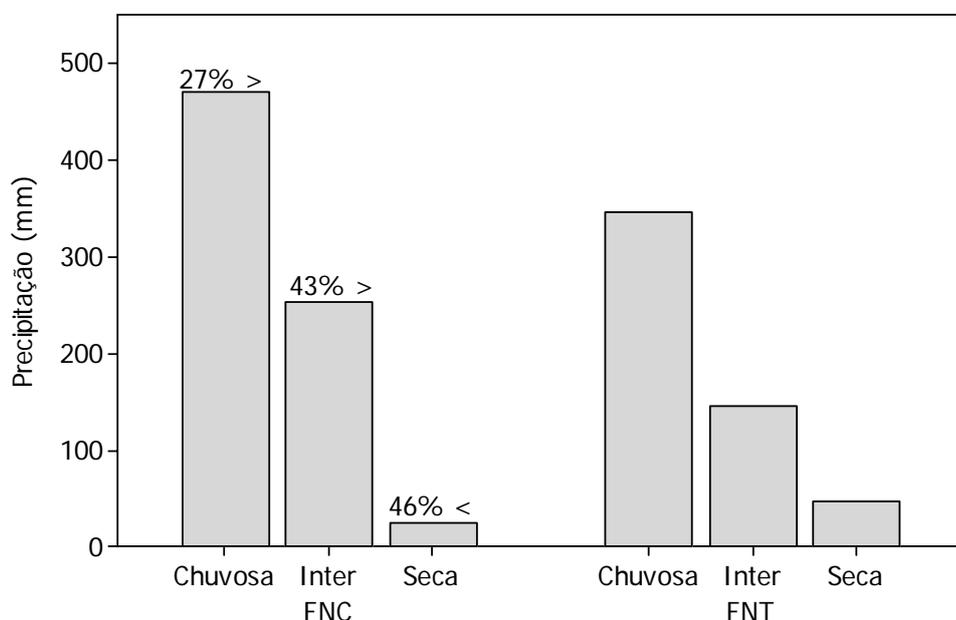


Figura 4 – Comparação entre os volumes médios de precipitação na Floresta Nacional de Caxiuanã (F.N.C.) e Floresta Nacional do Tapajós (F.N.T.) durante o período de amostragem

3.2.2 Amostragem

3.2.2.1 Coleta das amostras de metano no perfil vertical da floresta

As amostras de ar atmosférico foram coletadas em campanhas trimestrais durante as estações seca e chuvosa e no período de transição entre elas, nas diferentes áreas de estudo. Foram coletadas amostras pareadas (uma para análise isotópica e outra para análise de concentração) em cada altitude no perfil das torres de fluxo durante 2 ou 3 dias consecutivos. As amostras foram coletadas nas seguintes alturas: próximo ao solo (0,20m); no sub-bosque (7,0 e 15,0m); entre o dossel (22,0 e 35,0m) e acima do dossel (45,0 m). As coletas foram realizadas nos horários: 4:00, 12:00, 16:00, 22:00 e 24:00 h. O mesmo procedimento de coleta foi usado em todos os locais de estudo.

A amostragem foi baseada no método descrito por Ometto et al. (2002). As amostras foram puxadas por uma bomba através de tubos (Dekodron, 6 mm de diâmetro) fixados às torres e em seguida foram armazenadas em frascos de vidros (60 mL). O ar puxado pela bomba foi armazenado e lacrado no interior de um recipiente com água o que evitou a contaminação da amostra com ar do local da coleta (base da torre). Os frascos foram selados com septo de borracha (butil)²¹ impermeável ao gás.

Antes de cada amostragem o ar acumulado nos tubos foi expelido durante 5 minutos para garantir que o ar coletado viesse da altura desejada do perfil da floresta.

A tabela a seguir mostra o período em que as coletas foram realizadas nas diferentes estações do ano, assim como o número de amostras analisadas quanto à composição isotópica ($\delta^{13}\text{CH}_4$) e concentração $[\text{CH}_4]$. Ressalta-se que um mesmo mês (janeiro, por exemplo) pode aparecer em mais de uma classificação para estação do ano. Isso se deve ao fato de o volume de chuva precipitado nesse mês (ver Figura 3) ter variado muito ao longo do período de estudo.

²¹ Septo impermeável a gás, importado da Bellco Glass, Inc. Part #: 2048-11800.

Tabela 6 – Período de coletas e número (*n*) de amostras analisadas em cada estação do ano quanto à composição isotópica ($\delta^{13}\text{CH}_4$) e concentração de metano [CH_4], na Floresta Nacional de Caxiuana (F.N.C.) e Tapajós (F.N.T.)

Local	Estação	Períodos de coleta	<i>n</i> ($\delta^{13}\text{CH}_4$)	<i>n</i> [CH_4]
F.N.C.	Chuvosa	Jan/08 (10 a 13)	51	64
	Intermediária	Mai/07 (27 a 29)	31	31
	Seca	Set/07 (27 a 30)	55	67
F.N.T.	Chuvosa	Mai/07 (19 a 21)	21	39
	Intermediária	Jan/06 (27); Dez/07 (27 a 30); Dez/08 (27 a 29)	118	107
	Seca	Jan/07 (13 a 14); Out/07 (22 a 25); Ago/08 (15 a 17)	107	80

3.2.2.2 Coleta das amostras de metano emitido pelo solo

Além das amostras coletadas no perfil da torre, foram coletadas amostras do ar emitido do solo para análise de sua concentração e determinação das taxas de emissões. As coletas ocorreram apenas em dois períodos do ano, durante a estação seca (agosto e outubro) e durante a estação intermediária (dezembro). O método de coleta consiste em retirar amostras de ar liberado pelo solo e armazenado em uma câmara estática de PVC, detalhes em Keller et al. (2005). A câmara foi colocada próximo ao local onde o tubo correspondente a menor altitude do perfil da torre está colocado. Após o fechamento da câmara as amostras de ar foram coletadas em intervalos de tempo de 1, 10, 20 e 30 minutos.

Essas coletas foram realizadas apenas Floresta Nacional do Tapajós, em virtude da facilidade de acesso ao local de estudo e da disponibilidade do material necessário para realização das mesmas, nos Laboratórios do Projeto LBA-ECO e da EMBRAPA-Santarém.

3.2.3 Método Analítico

3.2.3.1 Análise da composição isotópica de metano

A composição isotópica das amostras foi determinada por espectrometria de massa no Laboratório de Ciências Marinhas da Universidade da Carolina do Norte-EUA, utilizando-se o equipamento modelo Finnigan Mat 252, acoplado a um cromatógrafo gasoso (HP 5890 GC) e a uma interface de combustão de fluxo contínuo (CF/GCC/MS). Durante o procedimento de análise uma amostra de 20 mL de ar atmosférico é injetada no sistema de fluxo contínuo, é carregada por hélio e atravessa um sistema de retenção por congelamento (-196 °C) para remover a maioria dos gases nitrogenados. A sub-amostra restante flui através de uma coluna de 30m (Poraplot Q) aquecida a 30°C, na qual o CH₄ é separado dos demais gases. Em seguida, o CH₄ sofre combustão a 940 °C e a água produzida é removida por um dissecante (Nafion). O CO₂ produzido é então carregado à fonte de íons do espectrômetro de massa para análise da taxa de ¹³C/¹²C.

O $\delta^{13}\text{C-CH}_4$ é expresso como desvio por mil (‰) de um padrão primário através da equação:

$$\delta^{13}\text{C-CH}_4 = \left(\frac{R_{\text{amostra}} - R_{\text{padrão}}}{R_{\text{padrão}}} \right) \times 1000 \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

R_{amostra} é a razão isotópica ¹³C/¹²C da amostra;

$R_{\text{padrão}}$ é a razão isotópica ¹³C/¹²C do padrão.

O $\delta^{13}\text{C-CH}_4$ é calculado em relação ao padrão PDB²² ($r_{\text{padrão}} = 0,0112372$).

²²Pee Dee Belemnite é um padrão obtido a partir de um fóssil marinho do Cretáceo (*Belemnitella americana*), oriundo da formação PeeDee na Carolina do Sul (CONNY; CURRIE, 1996).

3.2.3.2 Cálculo do valor estimado do $\delta^{13}\text{C}$ da fonte líquida CH_4 no dossel das florestas

Este cálculo foi feito através da combinação das seguintes equações:

1. Balanço de massa:

$$C_f = C_p - C_a \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

C_f é concentração do metano da fonte líquida;

C_p é concentração de metano medida ao longo do perfil de floresta;

C_a é o valor de referência para concentração do metano atmosférico²³.

2. Balanço de massa isotópico:

$$C_f * \delta_f = C_p * \delta_p - C_a * \delta_a \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

δ_f é a composição isotópica da fonte potencial de metano;

δ_p é composição isotópica do metano medido ao longo do perfil de floresta;

δ_a é o valor de referência para composição isotópica do metano atmosférico²⁴.

Substituindo C_f por $C_p - C_a$, temos:

$$\delta_f = \frac{C_a * \delta_a - C_p * \delta_p}{C_p - C_a} \quad (\text{Equação 4})$$

3.2.3.3 Estimativa da contribuição de fontes biogênicas e pirogênicas para a composição isotópica do CH_4 medido nas florestas

A contribuição de fontes biogênicas (isotopicamente mais leves) e fontes pirogênicas (isotopicamente mais pesada) de CH_4 foram obtidas através do cálculo de diluição isotópica, conforme as equações 5 e 6. Este modelo gera apenas uma

²³ O valor de referência ($1,83 \pm 0,01$ ppm) é a média \pm erro padrão das análises de 63 amostras analisadas no período de Dez/2002 a Jun/2005 e provenientes de coletas em sobrevôos sobre a FNT ao longo do ano e a uma altitude de aproximadamente 300m. Dados disponíveis em: <http://lba.cptec.inpe.br/beija-flor/>

²⁴ O valor de referência ($-46,97 \pm 0,01\%$) é a média \pm erro padrão de dados preliminares das análises de 250 amostras coletadas semanalmente na Ilha de Ascensão, UK ($7^\circ 56' 0''$ S, $14^\circ 22' 0''$ O; 54m), no período entre jan/2006 e dez/2008. Dados disponíveis em: <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/iadv/>

aproximação do um valor da contribuição de cada fonte, visto que se baseia na presença de somente duas fontes distintas. No entanto, em ambientes de floresta o CH₄ pode ter diferentes origens.

$$\%_{\text{bio}} = \left[\frac{\delta_f - \delta_{\text{piro}}}{\delta_{\text{bio}} - \delta_{\text{piro}}} \right] \times 10^2 \quad (\text{Equação 5})$$

$$\%_{\text{piro}} = 100 - \%_{\text{bio}} \quad (\text{Equação 6})$$

Onde:

$\%_{\text{bio}}$ e $\%_{\text{piro}}$ representam a contribuição de fontes biogênicas e pirogênicas (queimadas), respectivamente;

δ_f é valor estimado do $\delta^{13}\text{C}$ da fonte potencial de CH₄. Calculado através da Equação 4;

δ_{bio} é o valor médio de $\delta^{13}\text{C}$ do metano emitido por fontes biogênicas na Amazônia nas diferentes estações do ano de acordo com Moura et al. (2008);

δ_{piro} é o valor médio $\delta^{13}\text{C}$ do CH₄ emitido através da queima de biomassa de acordo com Lassey et al. (2000).

3.2.3.4 Análise da concentração de metano

A concentração do metano foi determinada por cromatografia gasosa com detecção por ionização de chama (Shimadzu 14A – Greenhouse). Resumidamente, o processo de análise consiste no preenchimento de um “loop” com a amostra gasosa com o auxílio de uma seringa de 60 mL; em seguida a amostra é carreada por nitrogênio (fluxo de 30 mL min⁻¹) para a coluna analítica (HaySep D) e depois para o detector (FID), onde uma mistura de ar sintético e hidrogênio (H₂) garantem a combustão da amostra.

A temperatura da coluna foi mantida a 45°C com o tempo de retenção para o metano de 1,68 min. Foram utilizados padrões com certificação internacional (National Oceanic and Atmospheric Administration/Climate Monitoring And Diagnostic Laboratory -NOAA/CMDL) com diferentes concentrações para o estabelecimento das curvas de calibração. A precisão da análise foi dada pelos

desvios da concentração dos padrões cuja variação tolerada deve ficar em torno de 1 a 3%.

3.2.4 Análises estatísticas

Para cada variável analisada verificou-se se esta apresentava distribuição normal através de um teste de normalidade (Anderson-Darling). Posteriormente, as diferenças entre as variáveis que apresentaram distribuição normal foram avaliadas por testes paramétricos e as que não apresentaram distribuição normal foram avaliadas por testes não-paramétricos. Os resultados foram considerados estatisticamente significantes quando o nível descritivo (p) foi $\leq 0,05$. Os softwares MINITAB 15.1.0.0 e SIGMA PLOT 8.0 foram utilizados na elaboração de gráficos e testes estatísticos.

3.3 Resultados

3.3.1 Composição isotópica de metano no perfil vertical da floresta

Na Floresta Nacional de Caxiuanã a maioria dos valores (96%) está acima do valor de referência (-46,97‰), ou seja, são mais enriquecidos em ^{13}C . Já na Floresta Nacional do Tapajós a porcentagem de valores mais enriquecidos em ^{13}C em relação ao valor de referência foi igual a 71% (Figura 5).

Na Floresta Nacional de Caxiuanã a composição isotópica do CH_4 variou entre -48,70‰ e -46,80‰, com média (\pm erro padrão) igual a $-47,63 \pm 0,04$ ‰ (Figura 5). Na Floresta Nacional do Tapajós o $\delta^{13}\text{CH}_4$ variou entre -49,24‰ e -45,50‰, sendo o valor médio (\pm erro padrão) para todo o período amostrado igual a $-47,32 \pm 0,04$ ‰ (Figura 5).

Embora o intervalo de variação entre o menor e maior valor do $\delta^{13}\text{CH}_4$ na F.N.C. seja de apenas 1,90‰, as estações do ano são estatisticamente diferentes entre si ($p= 0,006$), sendo que a estação chuvosa é aquela que apresentou valores menos enriquecidos em ^{13}C .

Similarmente ao observado na F.N.C., ocorreu na F.N.T. uma diferença significativa entre as estações do ano ($p= 0,001$). No entanto, nesse sítio a estação intermediária foi aquela que apresentou valores menos enriquecidos em ^{13}C .

Tanto na F.N.C quanto na F.N.T. a maioria dos valores observados de $\delta^{13}\text{CH}_4$ é empobrecida em ^{13}C em relação ao valor de referência adotado para CH_4 atmosférico.

3.3.2 Concentração de metano no perfil vertical da floresta

Com exceção de uma única amostra coletada durante a estação intermediária na F.N.T., a concentração de CH_4 em ambas as áreas esteve sempre acima do valor de referência (1,83ppm), demonstrando que as florestas exercem forte influência sobre a concentração desse gás no ecossistema.

Na Floresta Nacional de Caxiuanã a concentração de CH_4 variou entre 1,83 e 2,75ppm, com média (\pm erro padrão) igual a $2,08 \pm 0,02$ ppm (Figura 6). Na Floresta

Nacional do Tapajós a concentração variou entre 1,82 e 3,19ppm, sendo o valor médio (\pm erro padrão) para todas as amostras igual a $2,11 \pm 0,02$ ppm (Figura 6).

De modo similar ao observado quanto aos valores da composição isotópica do CH_4 , a concentração de CH_4 apresentou também uma variação sazonal em ambos os sítios de coleta. Na F.N.C. a estação chuvosa se diferenciou ($p= 0,000$) como a aquela que apresentou a menor média de concentração ($1,93 \pm 0,004$ ppm). Já na F.N.T. foi a estação intermediária que se diferenciou das demais ($p= 0,000$) e apresentou a menor média de concentração ($1,95 \pm 0,007$ ppm).

A comparação entre os valores medianos (para cada estação do ano) da composição isotópica e da concentração de CH_4 ao longo do perfil das florestas mostrou que, de modo geral, não existem diferenças significativas entre os compartimentos amostrados próximos ao solo, no sub-bosque, na copa e na atmosfera logo acima das florestas (Figura 7). Somente na Floresta Nacional do Tapajós e somente durante a estação intermediária, ocorreu diferença entre o valor de concentração medido próximo ao solo (0,2m) em relação aos demais compartimentos (Tabela 7).

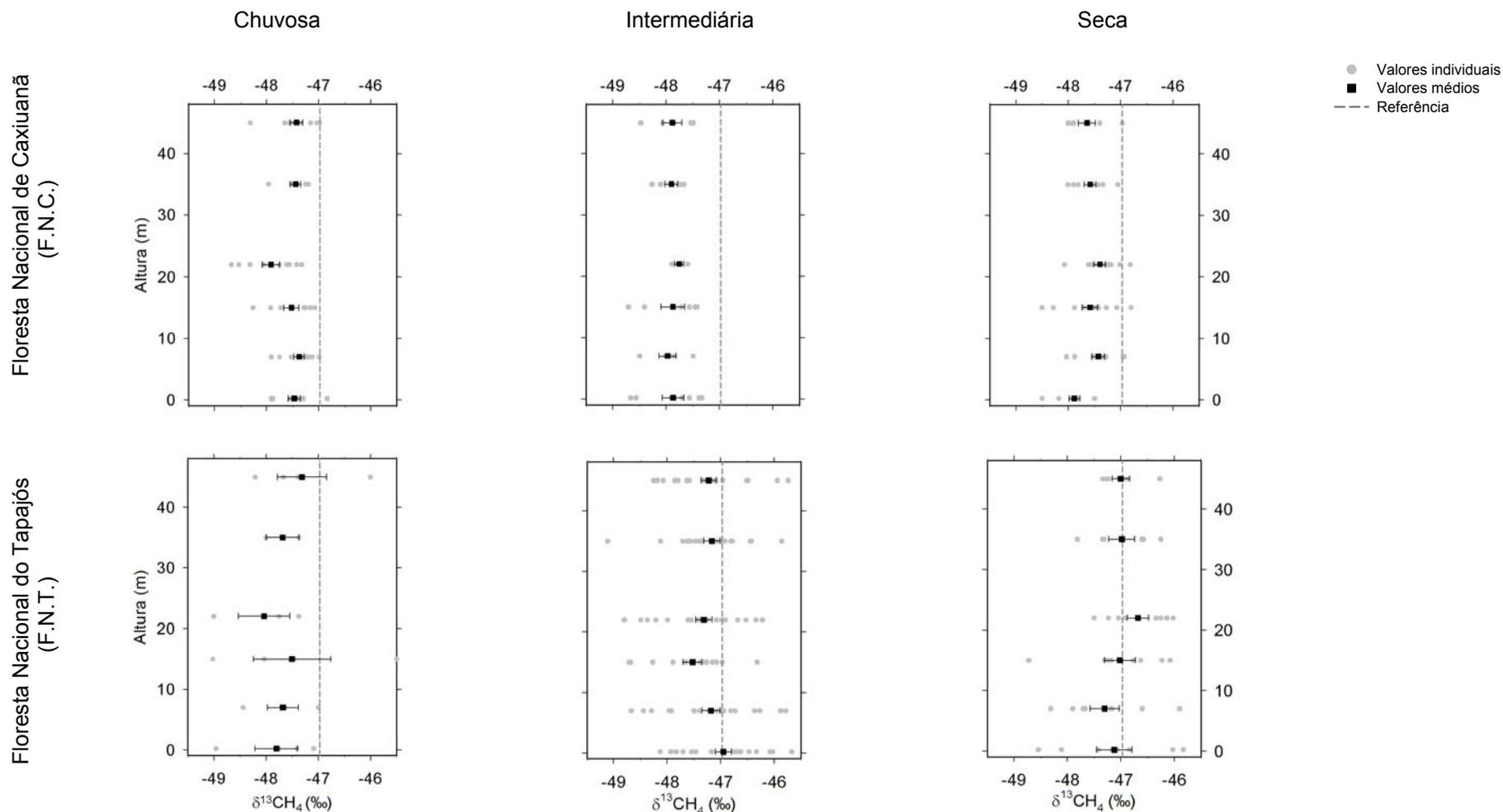


Figura 5 – $\delta^{13}\text{CH}_4$ nos perfis verticais da F.N.C. e F.N.T.. Os dados representam a variação dos valores médios (\pm erro padrão) medidos durante as estações chuvosa, intermediária e seca. A linha tracejada representa a referência para os valores $\delta^{13}\text{CH}_4$ do ar atmosférico²⁵

²⁵ O valor de referência ($-46.97 \pm 0,01\text{‰}$) é a média \pm erro padrão de dados preliminares das análises de 250 amostras coletadas semanalmente na Ilha de Ascensão, UK ($7^\circ 56' 0''$ S, $14^\circ 22' 0''$ O; 54m), no período entre jan/2006 e dez/2008. Dados disponíveis em: <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/iadv/>

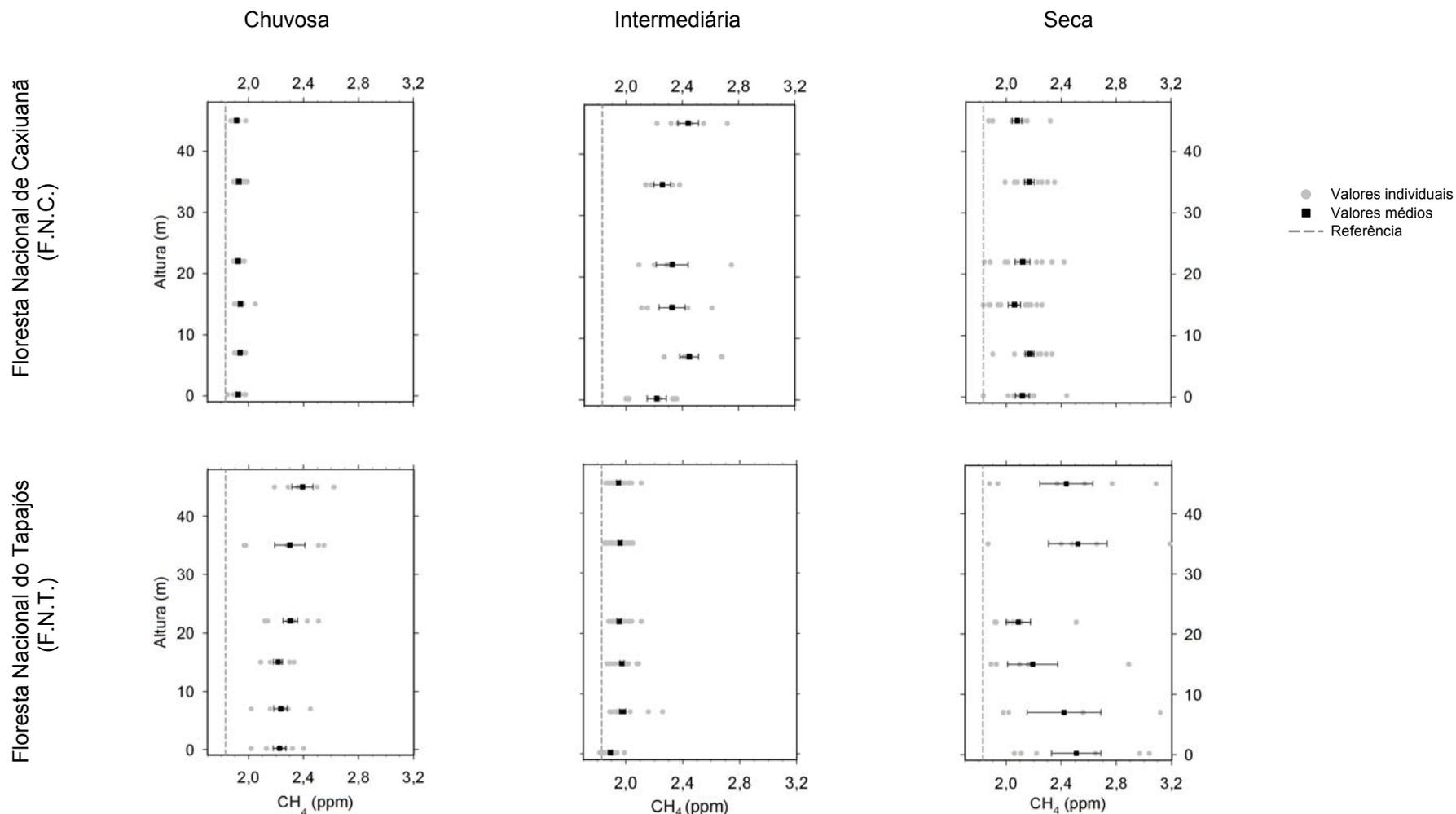


Figura 6 – Concentração de CH₄ nos perfis verticais da F.N.C. e F.N.T.. Os dados representam a variação dos valores médios (\pm erro padrão) medidos durante as estações chuvosa (Mai/07), intermediária (Jan/06, Dez/07, Dez/08) e seca (Jan/07, Out/07, Ago/08). A linha tracejada representa a média para os valores da concentração de CH₄ no ar atmosférico²⁶

²⁶ O valor de referência ($1,83 \pm 0,01$ ppm) é a média \pm erro padrão das análises de 63 amostras analisadas no período de Dez/2002 a Jun/2005 e provenientes de coletas em sobrevôos sobre a FNT ao longo do ano e a uma altitude de aproximadamente 300m. Dados disponíveis em: <http://lba.cptec.inpe.br/beija-flor/>

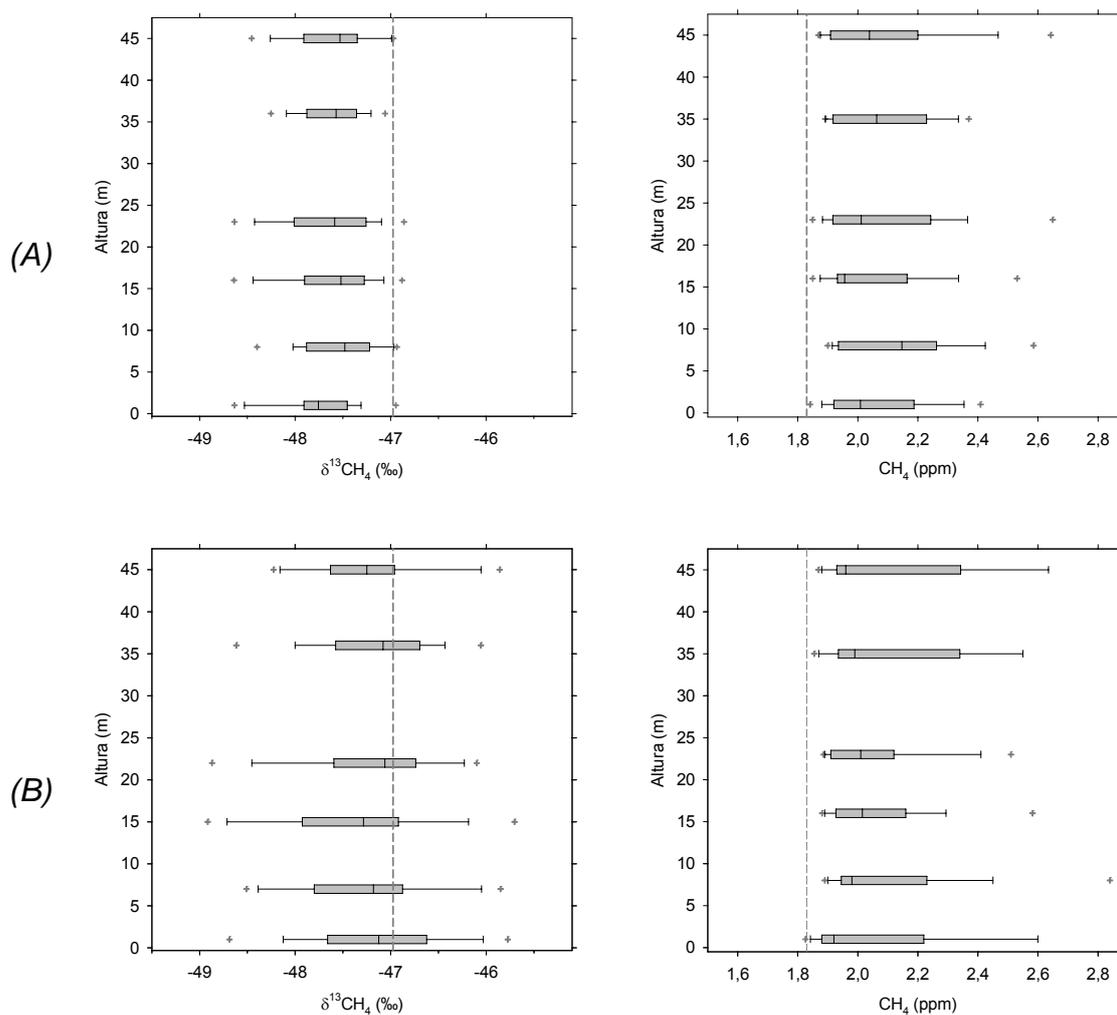


Figura 7 – Média anual dos valores de $\delta^{13}\text{CH}_4$ (esquerda) e de concentração de CH_4 (direita) nos perfis verticais das Florestas Nacionais de Caxiuanã (A) e Tapajós (B). As linhas tracejadas representam a média para os valores $\delta^{13}\text{CH}_4$ e concentração de CH_4 do ar atmosférico medido na Ilha de Ascensão e em sobrevôos a 300m sobre a Floresta Nacional do Tapajós, respectivamente²⁷

²⁷ Valores de referência ($-46.97 \pm 0,01\%$; $1,83 \pm 0,01$ ppm).

As medianas da composição isotópica e da concentração apresentados na Tabela 7 foram utilizados nos cálculos da estimativa do valor de $\delta^{13}\text{C}$ da fonte potencial de CH_4 ao longo do perfil apresentadas no item a seguir.

Tabela 7 – Medianas e os valores de p obtidos na análise de “Kruskal–Wallis” na comparação entre os valores de $\delta^{13}\text{CH}_4$ e concentração das amostras CH_4 coletadas ao longo do perfil vertical da floresta entre as estações chuvosa, intermediária e seca. As alturas 7,0m e 15m, assim como as alturas 22m e 35m, foram agrupadas para formarem os compartimentos sub-bosque e copa, respectivamente

Local	Item	Estação	Solo (0,2m)	Sub- bosque (7-15m)	Copa (22-35m)	Atmosférico (45m)	p
F.N.T	$\delta^{13}\text{CH}_4$ (‰)	chuvosa	-47,59	-47,64	-47,75	-47,53	0,955
		intermediária	-46,86	-47,26	-47,05	-47,25	0,309
		seca	-47,47	-47,44	-47,38	-47,31	0,497
		anual	-47,17	-47,39	-47,34	-47,28	0,467
	[CH_4] (ppm)	chuvosa	2,22	2,23	2,31	2,36	0,190
		intermediária	1,90	1,98	1,96	1,93	0,000
		seca	2,18	2,16	2,17	2,22	0,713
		anual	1,99	2,02	2,01	2,03	0,638
F.N.C	$\delta^{13}\text{CH}_4$ (‰)	chuvosa	-47,46	-47,31	-47,55	-47,37	0,234
		intermediária	-47,70	-47,86	-47,77	-47,86	0,974
		seca	-47,82	-47,47	-47,47	-47,78	0,074
		anual	-47,76	-47,50	-47,58	-47,53	0,430
	[CH_4] (ppm)	chuvosa	1,92	1,93	1,92	1,91	0,066
		intermediária	2,29	2,42	2,29	2,42	0,145
		seca	2,10	2,16	2,14	2,10	0,478
		anual	2,06	2,01	2,06	2,04	0,874

3.3.3 Estimativas da composição isotópica de fontes potenciais de CH₄ e contribuição de fontes pirogênicas e biogênicas de CH₄ em florestas

A estimativa para o valor de $\delta^{13}\text{C}$ da fonte potencial de CH₄ medido nos compartimentos do perfil vertical de florestas; calculados através da Equação 4, são apresentados na Tabela 8. Na F.N.T. os valores variaram entre -43,98‰ e -52,37‰, com média igual a -49,61‰. Já na F.N.C. os valores estimados variaram entre -50,24‰ e -59,34‰ com média igual a -53,09‰, ou seja, 3,48‰ mais empobrecidos em ^{13}C em relação a média observada na F.N.T.

Do modo geral, os valores anuais estimados de $\delta^{13}\text{C}$ da fonte potencial de CH₄ aumentam a longo do perfil da floresta, sendo que os valores observados na altura acima da copa das árvores (45m) foram quase sempre mais enriquecidos em ^{13}C em relação os valores anuais observados nas demais alturas. Esse aumento nos valores de $\delta^{13}\text{C}$ da fonte potencial de CH₄ deve ocorrer devido ao efeito cinético da oxidação do CH₄ no ar.

Tabela 8 – Valores estimados de $\delta^{13}\text{C}$ (‰) da fonte potencial de metano ao longo do perfil vertical da floresta entre as estações do ano e média anual, calculados através de balanços de massa. As alturas 7,0m e 15m, assim como as alturas 22m e 35m, foram agrupadas para formarem os compartimentos sub-bosque e copa, respectivamente

Local	Estação	Compartimentos			
		Solo (0,2m)	Sub-bosque (7-15m)	Copa (22-35m)	Atmosférico (45m)
F.N.T	Chuvosa	-50,50	-50,71	-50,72	-49,46
	intermediária	-43,98	-50,80	-48,18	-52,37
	Seca	-50,08	-50,05	-49,59	-48,91
	Anual	-49,46	-51,44	-51,10	-50,12
F.N.C	chuvosa	-57,42	-53,53	-59,34	-56,62
	intermediária	-50,60	-50,62	-50,95	-50,62
	Seca	-53,58	-50,24	-50,42	-53,27
	Anual	-54,05	-52,89	-52,43	-52,41

As estimativas da contribuição de fontes pirogênicas e biogênicas de CH₄ nas florestas tropicais são apresentadas na Tabela 9. Os valores foram calculados utilizando-se as equações 5 e 6 do modelo simples de mistura. Na F.N.T a contribuição de fontes pirogênicas varia em torno de 30%, enquanto que na F.N.C a contribuição média dessas fontes é de aproximadamente 20%. Foi na F.N.C que se observou a menor contribuição (9%) de fontes pirogênicas, a qual ocorreu durante a estação chuvosa. Isso se deve provavelmente, a quase inexistência de focos de queimadas nesse período do ano.

Tabela 9 – Estimativas da contribuição de fontes pirogênicas e biogênicas de CH₄ na Floresta Nacional do Tapajós e Floresta Nacional de Caxiuanã

Local	Estação	Valor de $\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$ da fonte potencial de CH ₄ *	Contribuição (%) de fontes pirogênicas	Contribuição (%) de fontes biogênicas
F.N.T	chuvosa	-50,3	27	73
	intermediária	-48,8	30	70
	seca	-49,7	31	69
	anual	-50,5	27	74
F.N.C	chuvosa	-56,7	9	91
	intermediária	-50,7	25	76
	seca	-51,9	25	75
	anual	-52,9	20	81

* Valor de $\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$ da fonte potencial de CH₄ representa a média entre os compartimentos (ver Tabela 8) para as estações do ano e para média anual.

3.3.4 Fluxo de CH₄ do solo

O fluxo de metano do solo na F.N.T. variou de -4,69 a 4,00 mg CH₄ m⁻² d⁻¹, e a média (±erro padrão) para o período amostrado foi igual a -1,17 ±0,28 mg CH₄ m⁻² d⁻¹. A maior parte das medidas apresentou resultados de fluxo negativo, indicando um consumo de CH₄ pelo solo. No entanto, foram observados valores positivos de fluxo principalmente durante as medidas ao final da tarde (16h).

Durante o período mais seco (agosto e outubro) predominam no ciclo diário os valores negativos de fluxo, já na estação mais úmida (dezembro), foram observados valores tanto positivos quanto negativos, indicando que o solo, ao longo do ciclo diário deixa de ser um sumidouro de CH₄ e passa a ser uma fonte desse gás (Figura 8).

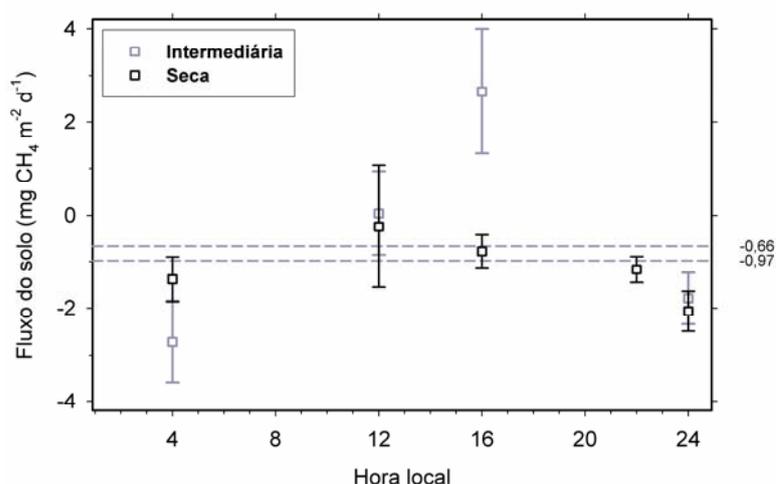


Figura 8 - Fluxo de CH₄ do solo na F.N.T.. Os dados representam as médias (±erro padrão) obtidas durante a estação seca (agosto e outubro) e durante a estação intermediária (dezembro). As linhas tracejadas cinza representam os valores médios de fluxo obtido por Varner e Keller (2008)²⁸ e por Davidson *et al.*, (2008)²⁹ em trabalhos realizados em áreas próximas durante a estação seca

²⁸ -0,97 (±0,30) mg de CH₄ m⁻² d⁻¹ Valor médio (± erro padrão) calculado a partir de 113 amostras coletadas na estação seca, no período entre Jul/2000 e Dez/2001 na FNT, distante aproximadamente 15km da torre usada neste trabalho (km67, FNT). Dados disponíveis em: <http://lba.cptec.inpe.br>

²⁹ -0,66 (±0,18) mg de CH₄ m⁻² d⁻¹ Valor médio (± erro padrão) calculado a partir de 269 amostras coletadas na estação seca, no período entre Set/1998 e Abr/2005 na FNT, distante aproximadamente 3km da torre usada neste trabalho (km67, FNT). Dados disponíveis em: <http://lba.cptec.inpe.br>

3.4 Discussão

Embora o número de amostras seja limitado, os dados apresentados sobre a concentração de CH_4 mostram certa discrepância entre a concentração no perfil vertical e consumo de CH_4 pelo solo observado na F.N.T. onde essas medidas foram realizadas. Devido à predominância de valores negativos no ciclo diário do fluxo de CH_4 (Figura 8), era esperado que a concentração do gás no perfil vertical fosse menor e/ou similar à concentração atmosférica. No entanto, contrariamente ao esperado, altos valores de concentração foram encontrados ao longo do perfil indicando uma possível existência de fontes significativas do gás nos compartimentos da floresta (Figura 6).

Como proposto por Keppler *et al.* (2006), produção de metano nas folhas (vivas ou mortas) das plantas pode ocorrer mesmo em condições aeróbicas. Em florestas tropicais também é possível ocorrer produção de CH_4 em microsítios nos troncos das árvores onde a água da chuva ou a umidade elevada podem criar um ambiente anóxico favorável à geração desse gás.

Desta forma, se o metano emitido pelas plantas através de suas folhas fosse realmente uma fonte expressiva desse gás nas florestas, seria esperado que houvesse uma diferenciação nos valores medidos à altura da copa das árvores, onde se concentra a maioria das folhas. Essa diferenciação deveria ser observada tanto em termos isotópicos quanto em termos da concentração do gás. No entanto, a altura em que o gás foi coletado não parece ter efeito algum sobre a composição isotópica, nem tão pouco sobre a concentração do gás, visto que não houve diferença estatística entre as alturas nas amostras coletadas ao longo do perfil (Tabela 7).

A diferença entre as estações do ano (variação sazonal) se deve, provavelmente, às diferenças no volume de chuva precipitado em cada uma das estações e às condições criadas pelo aumento ou diminuição da umidade do solo. Durante a estação chuvosa ocorre uma maior saturação do solo pela água das chuvas o que parece, em última instância, favorecer a produção CH_4 ou o não consumo deste.

Em ambos os sítios estudados, a concentração de CH_4 no perfil vertical está acima dos valores médios para amostras de ar atmosférico, que varia em torno de 1,83 ppmv em amostras coletadas sobre a F.N.T. (MILLER *et al.*, 2008). Crill *et al*

(2007) mostraram recentemente que a concentração média medida na Flona Tapajós varia entre 1,7 e 1,9 ppmv. No entanto, esses mesmos autores também encontraram valores acima de 2,2 ppmv para amostras coletadas em uma torre de fluxo localizada a aproximadamente 100m de distância da utilizada neste trabalho. Estes valores foram observados especialmente durante a estação seca. Miller et al (2007) também encontraram valores de até 1,93 ppmv para amostras coletadas em sobrevôos sobre a Flona Tapajós em ambas as estações do ano.

De modo geral, os perfis amostrados na Floresta Nacional do Tapajós apresentaram maior variação nos valores $\delta^{13}\text{CH}_4$ em relação aqueles amostrados na Floresta Nacional de Caxiuanã (Figura 7) e apresentam também valores mais enriquecidos em ^{13}C ($p= 0,025$).

As causas mais prováveis de variação na composição isotópica de CH_4 são mudanças nas fontes de C da matéria que dará origem ao gás, e/ou mudanças nos processos pelos quais essa matéria se transformará durante a metanogênese.

Como observado na Figura 3, o volume precipitado na F.N.C. é maior que aquele precipitado na F.N.T., assim como é menor o limite pluviométrico mensal usado neste estudo para delimitar o início da estação seca ($\leq 82,65$ mm) em relação ao mesmo limite na F.N.T. ($\leq 82,65$ mm). Além disso, a F.N.C. está localizada em uma área bem mais úmida e mais próxima de áreas alagadas (igapós) em relação à F.N.T.

Aliado a isso, observa-se que no entorno da torre de fluxo da F.N.C. o relevo apresenta altitudes muito menores em relação ao terreno do entorno da torre de fluxo da F.N.T. (Figura 2-C). Ou seja, os níveis de pluviosidade e o relevo dão à F.N.C. características que favorecem a produção biogênica de CH_4 . A maior proximidade com o lençol freático e a maior umidade relativa do ar e do solo podem favorecer o estabelecimento da comunidade bacteriana metanogênica em detrimento à metanotrófica, desfavorecendo assim a oxidação do CH_4 (ITOH et al., 2009), umas das causas para a depleção em ^{13}C do CH_4 atmosférico.

Essa característica pode ser responsável pelo sinal isotópico mais empobrecido em ^{13}C observado nesse sítio, visto que áreas alagadas são tipicamente responsáveis pela emissão de CH_4 empobrecido em ^{13}C em relação à outras fontes desse gás (HORNIBROOK et al., 2000; LASSEY et al., 2000; MILLER et al., 2002; FLETCHER et al., 2004; MOURA et al., 2008)

Outro fator que deve ser considerado é a existência de produção de CH_4 via queima de biomassa, o que nesse caso ocorreria através da queima de florestas ou pastagens nas regiões estudadas. Essa via metanogênica gera moléculas de CH_4 com composição isotópica diferenciada (isotopicamente mais pesado) do CH_4 produzido via decomposição da matéria orgânica por bactérias (STEVENS; ENGELKEMEIR, 1988; WAHLEN et al., 1989; CHANTON et al., 2000; FERRETTI et al., 2005).

A Figura 9 mostra o número de focos de queimadas observados durante os anos de 2007 e 2008 em um raio de 100 km das torres de fluxo na F.N.T. e F.N.C.. Na F.N.C. foram observados 1575 focos, enquanto que na F.N.T. foram observados 2245 durante o mesmo período, ou seja, 43% a mais que na F.N.C..

Além da diferença na densidade de focos por área, outro fator importante é a localização destes em relação às torres de fluxo. Na F.N.T. a maioria dos focos localiza-se a leste da torre, já na F.N.C. a maioria dos focos localiza-se a oeste da torre (Figura 9-C). Isso pode influenciar as medidas visto que na F.N.T. os ventos predominantes sopram de leste a oeste (SALESKA et al., 2003; ACEVEDO et al., 2004; SAKAI et al., 2004; MILLER et al., 2007) e portanto, podem trazer consigo o CH_4 gerado durante as queimadas. Já na F.N.C. a influência dos ventos é relativamente menor no que se refere ao transporte de CH_4 , visto que neste local de coleta os ventos predominantes, especialmente durante a estação seca (~61%) vem do nordeste (CARSWELL et al., 2002), que por sua vez não apresenta grande número de focos de queimadas (Figura 9-B).

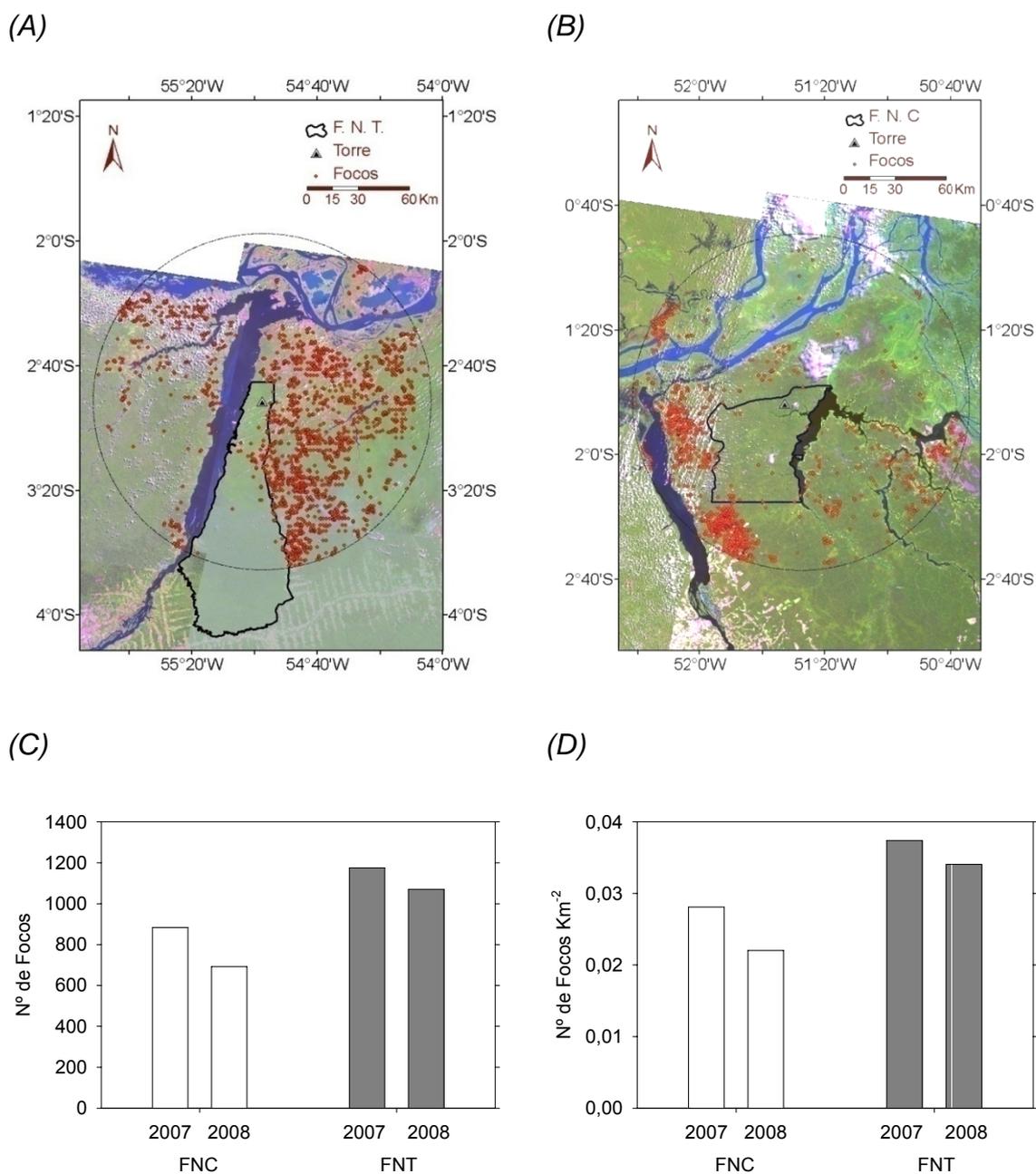


Figura 9 – Localização dos focos de queimadas³⁰ na F.N.T. (A) e na F.N.C. (B), número de focos (C) e densidade do número de focos (D) em um raio de 100 km em relação as torres de fluxo usadas para coletas de CH₄ durante os anos de 2007 e 2008

³⁰ Dados do Banco de Dados de Queimadas do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. Disponíveis em : <http://www.dpi.inpe.br/proarco/bdqueimadas/>

Embora a variação entre os valores médios de $\delta^{13}\text{CH}_4$ observados na F.N.C. para cada estação do ano seja relativamente pequena, existe diferença significativa entre elas ($p= 0,001$). A análise de variância indicou que a estação intermediária foi aquela que mais se diferenciou, apresentando os valores mais empobrecidos em ^{13}C . No entanto, essa diferença não está relacionada somente com o volume de chuva precipitado em cada uma das estações, visto que não se observou correlação significativa entre os valores de $\delta^{13}\text{CH}_4$ e volume de chuva precipitado ($p = 0,934$).

O mesmo comportamento foi observado no que se refere aos valores de concentração de CH_4 obtidos, sendo a estação intermediária aquela que apresentou os maiores valores ($p = 0,000$) que por sua vez, não tiveram correlação significativa com o volume de chuva precipitado ($p= 0,646$). Na F.N.T. as tendências foram similares, exceto pelo fato de que neste local de coleta foi na estação chuvosa que se observou os valores de $\delta^{13}\text{CH}_4$ mais empobrecidos em ^{13}C ($p = 0,006$) e também os maiores valores de concentração ($p = 0,000$).

Tendo em vista que a precipitação por si só não explica as variações na composição isotópica e na concentração de CH_4 , deve-se atentar para a combinação dos efeitos decorrentes das variações de outros parâmetros. Basicamente, ao longo do ano, tanto a concentração quanto a composição isotópica do CH_4 podem ser afetados pelas variações no balanço entre produção e oxidação microbiana no solo (fluxo do solo), pela contribuição das queimadas e por possíveis fontes localizadas ao longo do perfil vertical das florestas (emissão aeróbica pelas folhas, cupins, microsítios de produção anaeróbica nas cascas dos troncos e galhos e possivelmente pela emissão via transpiração das plantas).

A amplitude de variação obtida durante as medidas de fluxo de CH_4 do solo é similar à encontrada por Davidson et al. (2004) e por Keller et al. (2005) em estudos realizados também na Flona Tapajós e com características semelhantes em relação ao tipo de solo e cobertura vegetal. Estes autores também encontraram, na maioria de suas medidas, fluxos negativos de CH_4 e fluxos positivos esporádicos, especialmente durante a estação chuvosa, quando a saturação do solo favorece o desenvolvimento de bactérias metanogênicas, que por sua vez produzem metano a partir da decomposição da matéria orgânica disponível no solo e serapilheira.

A maior parte das medidas de fluxo de metano em solos amazônicos tem sido realizada durante o período diurno (KELLER et al., 1990; VERCHOT et al., 2000;

VELDKAMP et al., 2001; DAVIDSON et al., 2004; KELLER et al., 2005), e, portanto, podem não demonstrar claramente a variação no ciclo diário.

Do ponto de vista da composição isotópica do CH₄ no perfil vertical da floresta, o balanço entre consumo e produção é um fator determinante, visto que um maior consumo de metano pode representar um aumento nos valores de $\delta^{13}\text{CH}_4$, caso haja preferência pelo ¹³C por parte das bactérias metanotróficas.

Desta forma, durante os períodos mais úmidos, o fluxo positivo de CH₄ do solo certamente favoreceria o aumento nos valores de concentração e diminuição dos valores de $\delta^{13}\text{C}$, devido ao aporte de moléculas provenientes da via anaeróbica. Aliado a isso, na Amazônia, durante a estação chuvosa ocorre um aumento significativo do fluxo de CH₄ nas áreas de várzea (BARTLETT et al., 1988; DEVOL et al., 1990; WASSMANN et al., 1992; MELACK et al., 2004), e uma diminuição nos valores de $\delta^{13}\text{CH}_4$ (MOURA et al., 2008) devido ao aumento da superfície das áreas alagadas e às mudanças nas características ambientais promovidas pelo pulso de inundação. Mesmo estando distantes (~10 km) de grandes áreas alagadas (ver localização das torres na Figura 2), as medidas realizadas neste trabalho podem ter sido influenciadas pelo CH₄ emitido nas várzeas do entorno.

Estimativas de fluxo de CH₄ do solo realizadas na Floresta Nacional do Tapajós (DAVIDSON et al., 2004; KELLER et al., 2005; DAVIDSON, NEPSTAD et al., 2008) e outros locais da Amazônia Oriental (VERCHOT et al., 2000; CATTANIO et al., 2002) apresentaram variação sazonal similar a observada neste estudo (Figura 8). Os balanços anuais do fluxo de CH₄ do solo na Amazônia apresentam valores negativos, especialmente durante os períodos mais secos. No entanto, os solos das florestas podem tornar-se fontes desse gás durante a estação chuvosa, quando os níveis de umidade do solo atingem patamares que favorecem o crescimento do consórcio de bactérias anaeróbicas que geram CH₄ como subproduto da respiração.

A comparação entre os regimes de chuvas observados nas duas áreas de estudo (Figura 3) nos permite inferir que a F.N.C., devido ao maior volume de chuva, e conseqüentemente, maior excedente de água no solo, apresentaria maiores condições de sofrer a mudança no sentido do fluxo de CH₄ do solo, tornando-se uma fonte desse gás na estação chuvosa.

Na estação chuvosa, embora que em pequenas proporções, ocorre fluxo positivo de CH₄ do solo. Esse CH₄ excedente (empobrecido em ¹³C devido sua origem biogênica) contribuiria então para o aumento da concentração e diminuição nos valores de δ¹³CH₄ observados no perfil vertical da floresta. Como não existem queimadas nesse período, a contribuição quantitativa e qualitativa de CH₄ oriundo da queima de biomassa é irrisória. Durante o período seco esse cenário é modificado em consequência da diminuição da umidade do solo e, por conseguinte, há um aumento das taxas de difusão do CH₄ atmosférico para o solo (DORR et al., 1993; STRIEGL, 1993). O solo torna-se um sumidouro de CH₄ o que contribui para a diminuição do CH₄ no perfil devido à oxidação do gás. Ainda como subproduto desse processo é esperado que o CH₄ restante no ecossistema seja enriquecido em ¹³C em decorrência da preferência dos organismos metanotróficos pelo carbono mais leve (¹²C).

Ainda no período seco, ocorre nos arredores da F.N.T. um número expressivo de queimadas, atividade antropogênica comumente usada na manutenção de pastagens e na abertura de novas áreas agrícolas (DEFRIES et al., 2008; MORTON et al., 2008). Em termos quantitativos, a contribuição das queimadas (embora maior em termos de emissão por área) pode eventualmente se equivaler ao efeito da oxidação/consumo pelo solo, tendo em vista que a frequência e o tamanho das áreas onde o processo de queima acontece são inferiores em relação aos processos oxidativos.

No entanto, em termos qualitativos, o CH₄ das queimadas teria uma contribuição importante para a composição isotópica desse gás no ecossistema.

Dependendo do material queimado e da velocidade de queima, o δ¹³C das moléculas de CH₄ pode variar entre -12‰ e -25‰, ou seja, enriquecido em ¹²C quando comparados ao CH₄ resultante da produção biogênica em ambientes anóxicos que apresentam δ¹³C em torno de -60‰ (WHITICAR, 1999; LASSEY et al., 2000). Dentro desse intervalo, moléculas provenientes da queima de plantas C₄ (gramíneas em geral) apresentariam os maiores valores de δ¹³C (~-12‰), enquanto as moléculas provenientes da queima de plantas C₃ apresentariam os menores valores de δ¹³C, ou seja, aproximadamente -25‰. Quay et al. (1991), usando balanços de massa que incluem medidas de concentração de CH₄ e composição isotópica (¹³C e ¹⁴C), calcularam a contribuição das fontes de CH₄ provenientes da

queima de biomassa como sendo de aproximadamente 11% do total presente na atmosfera.

No Brasil, e especialmente na Amazônia, são raros os trabalhos científicos em que se realizou medidas quantitativas e qualitativas do CH₄ emitido durante a queima de biomassa vegetal. Desta forma, é difícil inferir qual seria o real efeito das queimadas nas medidas realizadas no presente estudo. Todavia, Miller e colaboradores (2007) analisando amostras de ar atmosférico coletadas em sobrevôos sobre duas áreas de floresta na Amazônia (Floresta Nacional do Tapajós e Reserva Biológica do Cuieiras) observaram um aumento da concentração de alguns gases de efeito estufa devido à contribuição das queimadas que ocorrem durante a estação seca.

As estimativas apresentadas na Tabela 9 para a contribuição de fontes pirogênicas e biogênicas de CH₄ ao longo do perfil vertical das florestas estudadas mostraram que na F.N.T. as queimadas seriam potencialmente responsáveis por no máximo 30% das fontes desse gás. Já na F.N.C. essa contribuição seria de apenas 20%. Dessa forma, o aumento da concentração de CH₄ no interior da floresta em relação à atmosfera, não pode ser totalmente atribuído à queima de biomassa que ocorre nas áreas adjacentes, embora estas sejam importantes. Mais uma vez, vale ressaltar que o modelo de mistura usado para esse cálculo admite apenas duas fontes do gás e que as estimativas poderiam ser ainda menores caso um modelo de mistura mais complexo fosse usado para esse cálculo.

Considerando que a maior parte (70% a 80%) do CH₄ medido nessas florestas tem origem biogênica, a possibilidade da existência de um processo de produção de CH₄ ainda não conhecido não pode ser descartada, visto que devem ser essas fontes as responsáveis pelo aumento da concentração do CH₄ observado no interior da floresta. No entanto, caso realmente existam, esses processos produziram o gás de maneira similar àqueles já conhecidos atualmente ou devem produzir moléculas de gás com sinal isotópico na mesma faixa de variação do sinal do CH₄ produzido biogenicamente.

3.5 Conclusão

Em ambas as florestas investigadas neste estudo, a composição isotópica do CH₄ e a concentração variaram sazonalmente, provavelmente em função das diferenças no volume de chuva precipitado em cada uma das estações e ao efeito das alterações nos teores de umidade do solo que pode favorecer a produção de CH₄ durante o período chuvoso ou consumo deste nos períodos mais secos.

Somente os valores de $\delta^{13}\text{CH}_4$ apresentaram variação espacial entre as florestas estudadas. Na F.N.T. foram observados valores ligeiramente mais enriquecidos em $\delta^{13}\text{C}$ em relação aqueles medidos na F.N.C. Considerando que nessas florestas as fontes de carbono da matéria orgânica são similares, acredita-se que a diferença na composição isotópica entre elas tenha ocorrido em função de mudanças nos processos de produção, nas taxas de oxidação do gás pelo solo ou ainda em função da contribuição de fontes pirogênicas de CH₄ (queimadas de florestas e pastagens).

Os valores médios de $\delta^{13}\text{CH}_4$ estiveram quase sempre abaixo do valor de referência para o CH₄, ou seja, eram mais empobrecidos em ^{13}C . Contrariamente, a concentração de CH₄ em ambas as áreas foi sempre maior que o valor de referência adotado, embora as medidas de fluxo indiquem ocorrer o consumo do gás pelo solo. A diferença entre o ecossistema de florestas e a atmosfera, em termos de concentração e composição isotópica do CH₄, deve ocorrer em função da interação entre a vegetação, taxas de transporte e taxas de produção e/ou consumo desse gás no solo no interior das florestas, além da interação com os ecossistemas adjacentes (áreas alagadas e áreas agrícolas).

A produção de CH₄ pelas folhas não representa uma fonte expressiva visto que não houve diferença significativa entre os valores referentes às amostras coletadas na altura da copa (22-35m) em relação às demais alturas.

A avaliação da contribuição das vias biogênica e pirogênica (queima de biomassa) na produção de CH₄, através de balanços de massa isotópicos, permitiu observar que a primeira via tem maior contribuição (em torno de 70%) na produção do gás. Essa característica foi mais facilmente observada na F.N.C onde a ocorrência de queimadas é menor.

De modo geral os valores da concentração e $\delta^{13}\text{C}$ do CH_4 refletiram o balanço entre a produção e o consumo do gás no interior das florestas. As variações observadas ao longo do período de estudo são o reflexo da variação da contribuição da produção biogênica (interna ou nas áreas alagadas do entorno), dos processos oxidativos que ocorrem no solo e ao longo do perfil e da contribuição de fontes pirogênicas.

4 VARIACÃO DA ATIVIDADE E EMISSÕES ^{222}Rn DO SOLO EM FLORESTAS DE TERRA-FIRME DA AMAZÔNIA: BASES PARA O USO DE ^{222}Rn COMO TRAÇADOR DE CH_4 EM ECOSISTEMAS TROPICAIS

RESUMO

O Radônio (^{222}Rn) pode ser utilizado como um traçador auxiliando no cálculo do balanço de CO_2 e CH_4 em áreas com diferentes tipos de uso do solo. Os objetivos deste trabalho foram: comparar as emissões de ^{222}Rn do solo em áreas de floresta primária, floresta com corte seletivo de madeira e área agrícola; identificar a variação espacial e sazonal da atividade deste gás no perfil vertical da floresta, e finalmente, utilizar a correlação entre estas medidas e a concentração de CH_4 no perfil vertical como um exercício na inferência indireta dos fluxos de CH_4 em áreas de floresta de terra-firme. Medidas de fluxo de ^{222}Rn do solo foram feitas utilizando-se detectores portáteis. A atividade de ^{222}Rn no perfil vertical foi medida por um sistema de medidas contínuas de ^{222}Rn instalado em uma torre de fluxo de 65 m localizada em área de floresta primária na Floresta Nacional do Tapajós. No período entre agosto de 2000 e dezembro de 2002, o fluxo de ^{222}Rn do solo nas três áreas estudadas variou entre 6,86 e 103,30 $\text{mBq m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e foi mais elevado na área agrícola. Não foram observadas diferença entre o fluxo medido na área de floresta primária e na área de corte seletivo de madeira. As estimativas de fluxo variaram em função das mudanças na umidade do solo. Os valores da atividade de ^{222}Rn variaram no perfil vertical da floresta primária de 5,27 a 18,17 Bq m^{-3} , 3,55 a 24,02 Bq m^{-3} e 3,36 a 18,30 Bq m^{-3} durante os anos de 2000, 2001 e 2002, respectivamente. Na comparação entre um mês representativo da estação chuvosa (mai/01) e outro da estação seca (set/01), não se observou diferença significativa nas médias gerais. No entanto, ocorreram mudanças no comportamento da atividade de ^{222}Rn ao longo do perfil. A atividade de ^{222}Rn correlacionou-se satisfatoriamente com as medidas concentração e do fluxo de CH_4 do solo o que permitiu a inferência da concentração de CH_4 baseado nas equações obtidas nestas correlações.

Palavras-chave: Radônio-222, Amazônia, floresta tropical de terra-firme, trocas gasosas, metano, gases traço

VARIATION IN ^{222}Rn ACTIVITY AND SOIL EMISSIONS IN AMAZONIAN UPLAND FORESTS: BASIS FOR THE USE OF ^{222}Rn AS A TRACER OF CH_4 IN TROPICAL ECOSYSTEMS

ABSTRACT

Radon (^{222}Rn) can be used as tracer in the determination of CO_2 and CH_4 balances in areas with different soil use. The objectives of this work were: to compare of ^{222}Rn soil emissions between primary forest, selective logged forest, and in an agricultural field; to identify spatial and seasonal variation in ^{222}Rn activity in a vertical profile of primary forest; and finally, to use linear correlations between ^{222}Rn measurements and CH_4 soil flux and concentration along the vertical profile as an attempt to indirectly infer CH_4 flux in upland forests. Ground flux measurements were provided by using portable detectors. ^{222}Rn activity along the vertical was measured by using a continuous tower-based atmospheric ^{222}Rn measurements system located in a primary forest at the Tapajos National Forest (T.N.F.). In period from Aug/2000 to Dec/2002, soil ^{222}Rn flux varied from 6.86 to 103.30 $\text{mBq m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e was higher in agriculture field than in the forest sites. Differences between forest primary and logged forest sites were not observed. Soil ^{222}Rn flux varied following changes in soil moisture. ^{222}Rn activity along the vertical profile varied from 5.27 to 18.17 Bq m^{-3} , from 3.35 to 24.02 Bq m^{-3} , and from 3.36 to 18.30 Bq m^{-3} during the years of 2000, 2001, and 2002, respectively. A comparison of wet (may/01) and dry (sep/01) seasons did not show significant differences between ^{222}Rn activity mean values. However, there were changes in the ^{222}Rn activity behavior along the profile. The ^{222}Rn activity correlated to the concentration and flux of CH_4 , yielding linear equations used to indirectly inference CH_4 concentration and flux in the forest ecosystem.

Key-words: Radon-222, Amazonia, upland tropical forest, gas exchange, methane, trace gases

4.1 Introdução

O monitoramento do fluxo de Radônio (^{222}Rn) e de sua concentração tem sido objeto de interesse científico e tecnológico devido ao seus múltiplos usos nas áreas da hidrologia, geologia, oceanografia e ciências da Terra, entre outras (CANOBA et al., 2001). Adicionalmente, o Radônio também pode ser utilizado como um importante elemento traço, auxiliando o cálculo do balanço gases de efeito estufa, como CO_2 e CH_4 (DORR; MUNNICH, 1990; DUEÑAS et al., 1996).

As trocas líquidas de gases traço entre as florestas de terra-firme e a atmosfera são um dos principais componentes do balanço regional de gases de efeito estufa. As características físicas do dossel das florestas e as correntes de ar sobre estas tem grande efeito sobre as trocas gasosas que ocorrem nesses ambientes determinando assim as “taxas líquidas” dos gases.

Dada a diversidade de eventos que podem ter efeito sobre essas trocas, a mensuração dessa interação requer alta frequência e acurácia das medidas das concentrações dos gases ao longo do perfil da floresta, o que em florestas tropicais representa um grande desafio tanto do ponto de vista logístico como metodológico.

Na Amazônia, as atividades desenvolvidas no âmbito do projeto LBA-ECO (Projeto de Larga Escala da Biosfera-Atmosfera da Amazônia)³¹ contribuíram significativamente para superação desse desafio e para o estabelecimento do balanço regional dos gases de efeito estufa (DAVIDSON; ARTAXO, 2004). A instalação de torres de fluxo em diversos pontos da bacia amazônica permitiu observar que os fluxos dos gases variam espacialmente e temporalmente, dependendo das características (relevo, solos, altura do dossel, composição florística, etc.) de cada floresta estudada. No entanto, a contribuição das torres de fluxo se deu principalmente no entendimento dos fluxos de CO_2 , sendo necessário portanto, um avanço nas técnicas de medidas e interpretação do fluxo de outros gases, como CH_4 e N_2O .

O uso da técnica da correlação dos vórtices turbulentos para determinação dos fluxos na interface floresta-atmosfera é bastante confiável no período diurno, ou quando a turbulência no interior da floresta é suficiente para que ocorra mistura do

³¹ LBA-ECO - Projeto de Larga Escala da Biosfera-Atmosfera da Amazônia. Projeto de cooperação internacional liderado pelo Brasil através do Ministério de Ciência e Tecnologia, que abrange grande extensão da bacia amazônica com a instalação de sítios de medidas, inclusive torres de fluxo de gases em florestas de terra-firme. Mais informações disponíveis em: <http://lba.cptec.inpe.br/lba/site/>.

ar através desta interface, mas é falha sob condições estáveis (PATTEY et al., 2002; ACEVEDO et al., 2004; MILLER et al., 2004).

Na Amazônia, onde são comuns períodos de baixa turbulência, principalmente durante a noite, é necessária para o uso dessa técnica, a aplicação de um fator de correção para estimativas anuais dos fluxos de carbono. Este fator de correção (u^*) é determinado através da exclusão das medidas realizadas sob condições de velocidade do vento abaixo de um limite pré-determinado e pela substituição destas por medidas realizadas em condições de maior turbulência e condições similares de temperatura do solo (GOULDEN et al., 1996).

Embora as medidas realizadas pelas torres de fluxo ocorram em alta frequência, o que implica dizer que existe um número de medidas suficientemente grande para que se faça a correta determinação dos fatores de correção. A aplicação desse procedimento ainda é motivo de discordância entre aqueles que fazem uso dessa técnica (SAKAI et al., 2001; MASSMAN; LEE, 2002; FINNIGAN et al., 2003; FINNIGAN, 2004).

Neste contexto, a busca por técnicas alternativas para validar as medidas obtidas pelo uso da técnica da correlação dos vórtices turbulentos (Eddy covariance) torna-se necessária e a utilização de traçadores como o ^{222}Rn surge como uma metodologia viável na elucidação destes balanços.

Martens et al. (2004), utilizaram novas técnicas de medida direta de ^{222}Rn para quantificar os processos de transporte e fluxo de CO_2 entre o dossel da floresta e a atmosfera. A utilização deste método em florestas tropicais representou uma alternativa viável para correção dos fluxos de CO_2 e demonstrou o potencial para o uso do ^{222}Rn como traçador de outros gases nestes ecossistemas.

Carmo et al. (2006) em estudo recente, demonstraram a ocorrência de um acúmulo de CH_4 e CO_2 no dossel de florestas de terra-firme da Amazônia em relação à atmosfera. Estas medidas, quando combinadas com dados sobre o transporte de ^{222}Rn , podem determinar a importância relativa da movimentação de gases traço no dossel da floresta, bem com, detectar as causas do acúmulo de metano no compartimento superior da floresta (TRUMBORE et al., 1990; MARTENS et al., 2004; SOTTA et al., 2007).

As taxas de fluxo de ^{222}Rn no perfil da floresta são influenciadas pelas variações nas taxas de emissão deste gás no solo, o que por sua vez podem variar em função das características físicas e dos níveis de umidade do solo (DORR;

MUNNICH, 1990; CHEN et al., 1995). Assim, a cobertura vegetal, bem como o manejo dos solos, podem tornar-se fatores importantes na variação das taxas de trocas gasosas no ecossistema.

O objetivo deste trabalho é comparar as emissões de ^{222}Rn do solo em floresta primária, floresta submetida a corte seletivo de madeira e áreas agrícolas na Amazônia oriental, bem como demonstrar a variação sazonal da atividade do ^{222}Rn ao longo do perfil vertical de floresta primária. Adicionalmente, utilizou-se a correlação entre as medidas da atividade de ^{222}Rn e medidas diretas da concentração de CH_4 no perfil vertical como metodologia alternativa na inferência indireta dos fluxos de CH_4 nesta área.

4.2 Material e métodos

4.2.1 Áreas de estudo

As medidas da atividade de ^{222}Rn foram realizadas na Floresta Nacional do Tapajós (F.N.T.) e em uma área agrícola adjacente a esta reserva. Foram usados três sítios distintos no âmbito do Projeto LBA-ECO, sendo uma área de floresta primária preservada (km 67), uma onde ocorreu exploração madeireira de impacto reduzido e corte seletivo de madeira (km 83) e por fim, uma área agrícola (km 77) que sofreu mudança no uso do solo sendo transformada em área de cultivo de arroz e posteriormente em plantio de soja (Figura 10).

Convencionou-se denominar as áreas de floresta primária, floresta submetida a corte seletivo e área agrícola como km67, km83 e km77, respectivamente, devido a localização dessas áreas de estudo ao longo da Rodovia Senador Jonas Pinheiro (BR-163), que liga a cidade de Santarém-PA à cidade de Cuiabá-MT

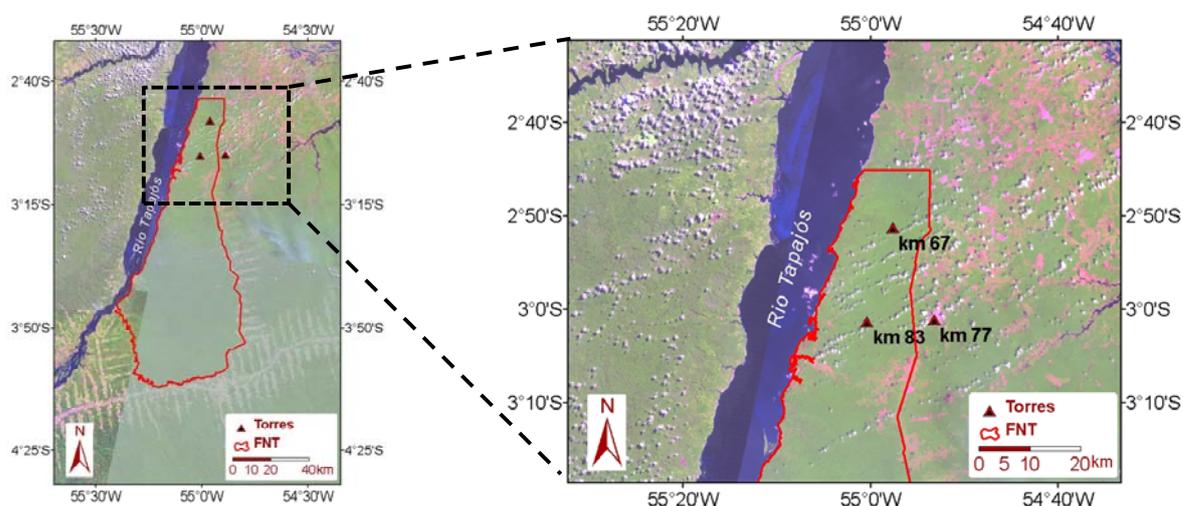


Figura 10 – Localização da Floresta Nacional do Tapajós (F.N.T.) e dos locais de coleta de ^{222}Rn

As áreas de floresta primária (km 67) e de corte seletivo (km 83) localizam-se na porção mais ao norte da Floresta Nacional do Tapajós (Figura 10). A área de floresta preservada (km 67) foi descrita anteriormente no item 3 deste manuscrito, (sub-item 3.2.1.2) e apresenta as mesmas características quanto à composição florística e tipos de solos que a área de corte seletivo (km83). Descrições mais detalhadas podem ser encontradas nos trabalhos publicados por (DA ROCHA et al.,

2004; DAVIDSON et al., 2004; MARTENS et al., 2004; MCGRODDY et al., 2004; MILLER et al., 2004; MILLER, S.D. et al., 2007; DAVIDSON, NEPSTAD et al., 2008; FIGUEIRA et al., 2008)

A área agrícola (km 77) se localiza adjacente a Floresta Nacional do Tapajós (3° 1' 11,25"S; 54° 53' 38,87"O). O local constituiu-se originalmente por uma pastagem de aproximadamente 500ha composta por *Brachiaria brizantha* e que ao longo do estudo teve o pasto substituído pelo plantio de arroz (*Oryza sativa* L.). A área de cultivo é circundada principalmente por floresta secundária que fora desmatada por volta de 1984 para formação da pastagem (SAKAI et al., 2004).

A formação do pasto ocorreu de forma convencional (após corte e queima da floresta) não tendo ocorrido em nenhum momento aragem do solo. A manutenção do pasto era realizada através da eliminação das espécies invasoras e por eventuais queimas.

A torre de fluxo (20m) está localizada na porção central da área e está equipada com medidores das principais variáveis micrometeorológicas, além medidores das concentrações de CO₂, vapor d'água e da atividade de ²²²Rn. Todos os equipamentos instalados são supridos por energia solar transformada através de painéis solares instalados no local. O menor raio entre a torre de fluxo e a floresta secundária circundante não é maior que 1 km (ACEVEDO et al., 2004; SAKAI et al., 2004).

A Figura 11 mostra as mudanças ocorridas no uso do solo na área agrícola durante o período de coleta deste trabalho.

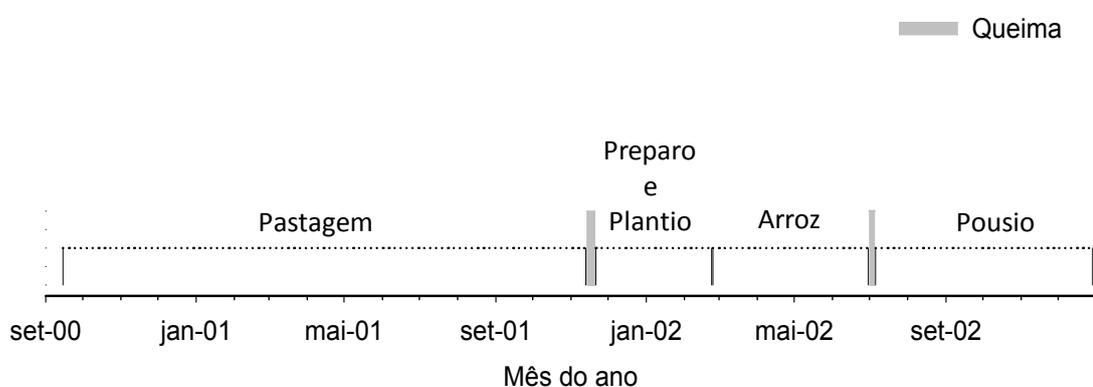


Figura 11 – Caracterização da mudança no uso do solo na área agrícola no período entre setembro/2000 e dezembro/2002

4.2.2 Detectores de ^{222}Rn

Foram utilizados dois tipos de detectores (Figura 12), que embora apresentem tamanhos e formas variáveis, funcionam com o mesmo princípio: os “detectores de fluxo contínuo”, utilizados nas medições ao longo do perfil vertical da floresta, e os “fluxômetros”, utilizados para as medidas de fluxo do solo. Ambos os detectores são formados por duas partes distintas: um recipiente de armazenamento e um componente eletrônico responsável pela amplificação e contagem dos pulsos gerados pelo detector. No primeiro, o recipiente de armazenamento tem capacidade para 20 litros de ar, já os fluxômetros têm capacidade de 15 litros de ar. Detalhes da descrição dos detectores são encontrados no trabalho de Martens et al (2004).

Detector de fluxo contínuo



Fluxômetro portátil



Figura 12 – Diferentes tipos de detectores de ^{222}Rn utilizados para medições feitas nos perfis verticais das torres e de fluxo do solo

Cada um dos detectores possui um número de série e uma calibração específica, obtida a partir de experimentos laboratoriais realizados no Departamento de Ciências Marinhas da Universidade da Carolina do Norte, Chapel Hill, NC, EUA.

O método de calibração consiste, basicamente, da passagem de ar comprimido (livre de Radônio) por um período de tempo a fim de verificar a

capacidade de resposta do detector, em seguida uma fonte conhecida de Radônio³² é adicionada para que se calcule os coeficientes de sensibilidade. É com base nesses coeficientes (específicos para cada detector) que se determinam os valores de fluxo de ^{222}Rn .

A Figura 13 representa um esquema simplificado da calibração de um fluxômetro (#51). O fluxo do ar é mantido por uma bomba de ar elétrica e regulado a 1 L m^{-1} por um fluxímetro. Quando o sistema é fechado, a concentração de ^{222}Rn no interior do recipiente de ar aumenta com o passar do tempo (concentração \times tempo). A expressão matemática da correlação linear entre do aumento da concentração com o tempo, produz valores de inclinação de reta (para cada vez que o sistema é fechado) que em seguida são correlacionadas com a atividade conhecida da fonte padrão utilizada, determinando-se assim, a sensibilidade de cada detector.

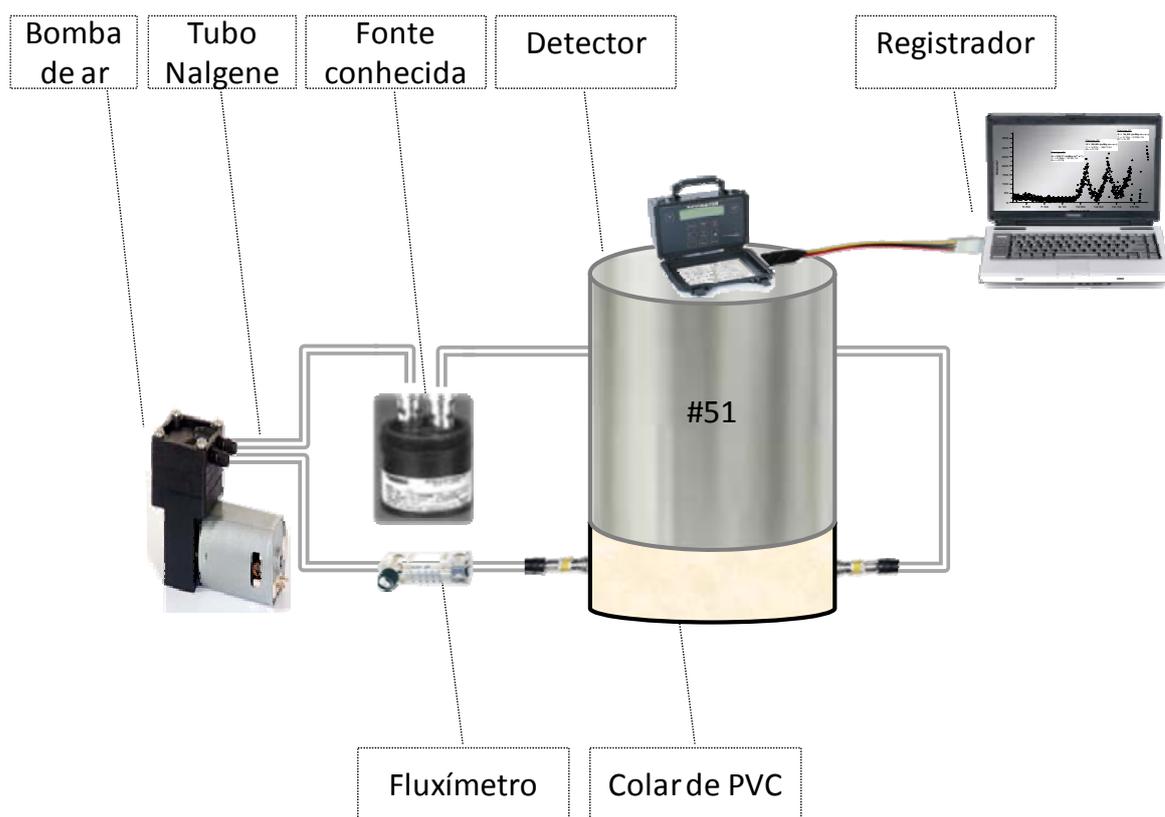


Figura 13 – Esquema simplificado da calibração dos detectores de ^{222}Rn

³² Ra-226 RNC, # 106, comercializada por Pylon Electronic Inc. (Ottawa, Ontario, Canada). <http://www.pylonelectronics.com/pylonpdfs/DS123R3.pdf>

4.2.3 Amostragem

4.2.3.1 Registro da atividade de ^{222}Rn no perfil vertical da floresta

A atividade de ^{222}Rn foi medida no perfil vertical de floresta primária (km 67) na Floresta Nacional do Tapajós, onde está localizada uma torre de fluxo (65 m) do Projeto de LBA-ECO (Figura 14–A). Nestas torres estão fixados sistemas coletores de ar em diferentes níveis da floresta (0,3; 1,0; 3,0; 10,7; 32,0; 37,0; 47,2 e 61,0 m), os quais estão conectados a detectores de fluxo contínuo que fazem o inventário da atividade de ^{222}Rn (Figura 14–B) e ao sistema de cromatografia gasosa que realiza as medidas da concentração de CH_4 (Figura 14–C) do ar nesse perfil. As medidas da atividade de ^{222}Rn foram tomadas a cada 15 minutos no período entre Ago/2000 e Dez/2004, mas os dados apresentados neste trabalho referem-se apenas ao período de 2000 a 2002. Devido a alta frequência com que as medidas foram realizadas, pode-se afirmar que este é um dos maiores banco de dados da atividade de ^{222}Rn adquirido até hoje.

O sistema de medida da atividade de ^{222}Rn consiste, basicamente, de um conjunto de tubos plásticos com calibre de 3/8", um conjunto de válvulas reguladoras do fluxo e tubos de secagem de ar, uma série de detectores e sistemas de aquisição de dados (Figura 14–B). O feixe de tubos vem da torre e entra em uma sala climatizada de uma cabana localizada próxima à torre. Cada tubo é conectado a uma válvula que controla a direção do fluxo de ar e o conduz a tubos de "Nafion", onde o ar foi seco. O sistema usa uma bomba que puxa o ar (45 litros por minuto) através dos tubos. Em seguida, o ar segue através de tubos de 1/4" em direção ao sistema de detectores de ^{222}Rn .

Exemplos do registro da atividade de ^{222}Rn medida ao longo do perfil vertical da torre na Floresta Nacional do Tapajós, km 67, são apresentado na Figura 15. Para facilitar a visualização, o conjunto de dados foi fragmentado em períodos de tempo iguais a um ano (2001), um mês (fev/2001), uma semana (12-18/02/01) e um único dia (15/02/01). É possível observar o padrão de mudança da concentração do gás ao longo do perfil e ao longo do tempo. Observa-se que ocorre a diminuição da concentração de ^{222}Rn com o aumento da altura amostrada, assim como durante o período diurno.

(A)



(B)



(C)



Figura 14 - Torre vertical-65m (A); Sistema de medição da atividade de ^{222}Rn do dossel (B), Sistema de medição da concentração de metano por cromatografia gasosa (C)³³

³³ O sistema de medição da concentração de CH_4 foi instalado no âmbito de pesquisa do Projeto LBA-ECO no mesmo período em que foi instalado o sistema de medição de ^{222}Rn , no entanto, os dados referentes as medidas de CH_4 ainda não foram disponibilizados.

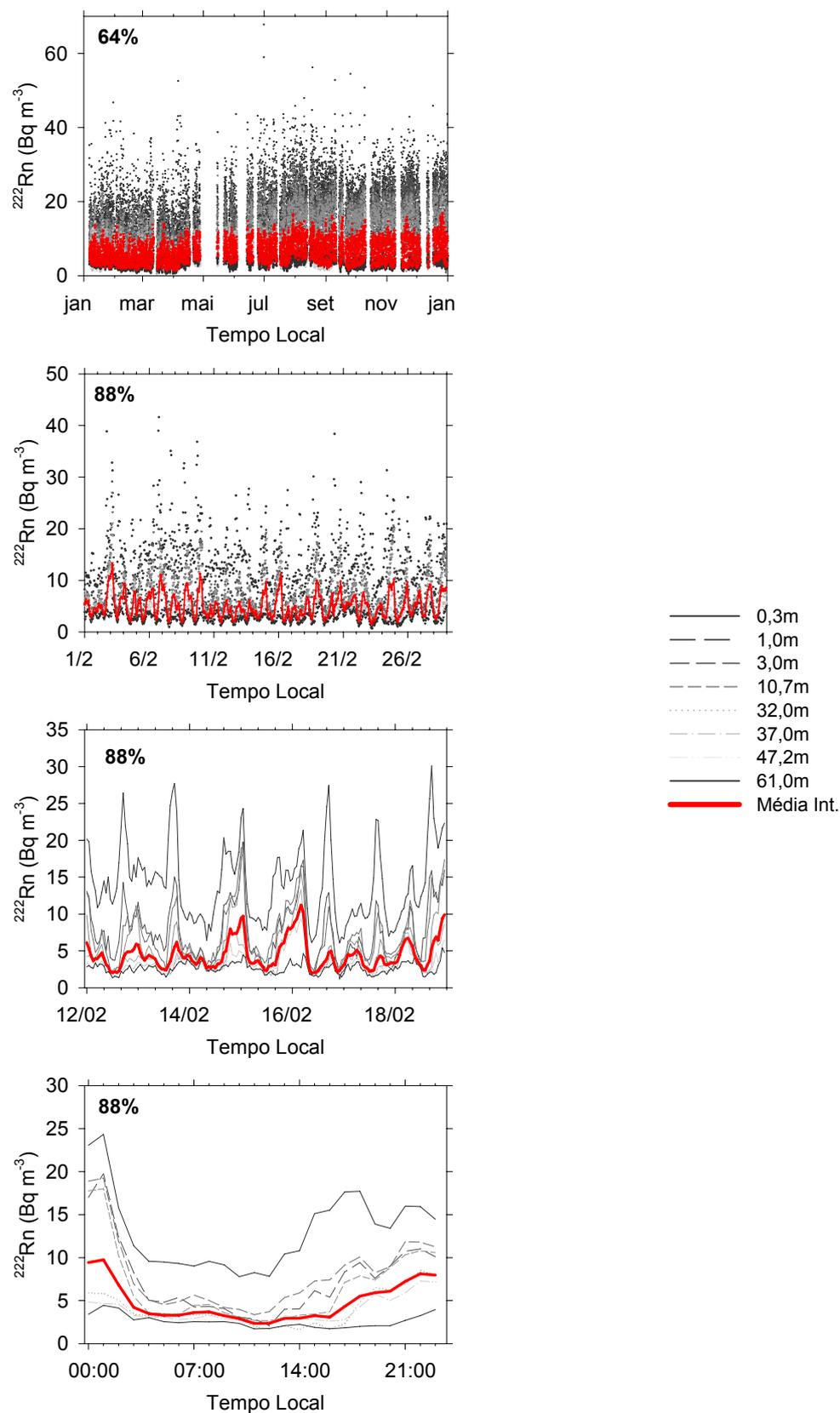


Figura 15 – Exemplos do inventário da atividade de ^{222}Rn medida ao longo do tempo (ano de 2001) no perfil vertical da floresta em diferentes alturas. A cobertura dos dados para cada período está expressa em percentagem no canto superior esquerdo de cada gráfico. O gráfico inferior refere-se ao dia 15 de fevereiro de 2001

4.2.3.2 Registro do fluxo de ^{222}Rn do solo

As medidas de fluxo de ^{222}Rn do solo foram feitas utilizando-se detectores portáteis (fluxômetro) acoplados às câmaras de PVC fixas ao solo (Figura 12). As câmaras de PVC (n=10, em cada área) foram instaladas no entorno das torres de fluxo, em um raio inferior a 100m. As medidas do fluxo de ^{222}Rn do solo iniciaram em maio de 2000 e se estenderam até dezembro de 2002, com freqüência de coleta semanal.

As coletas foram realizadas no período diurno, normalmente entre os horários de 9:00 e 15:00h. Além da medida de fluxo de ^{222}Rn , outros parâmetros como a umidade do solo eram medidos.

O procedimento de medida consiste basicamente no posicionamento do detector sobre a câmara de PVC criando assim um sistema fechado na interface solo-ar. O fechamento e abertura desse sistema ocorrem em intervalos alternados de 60 minutos. O fluxo de ^{222}Rn foi calculado a partir do coeficiente angular da reta obtida pela regressão linear entre a contagem de partículas alfa emitidas pelo solo ao longo do tempo. Detalhes sobre a detecção das partículas de ^{222}Rn pelo fluxômetro estão descritos em Martens et al. (2004).

Um exemplo do registro do fluxo de ^{222}Rn do solo (S) encontra-se representado a seguir (Figura 16).

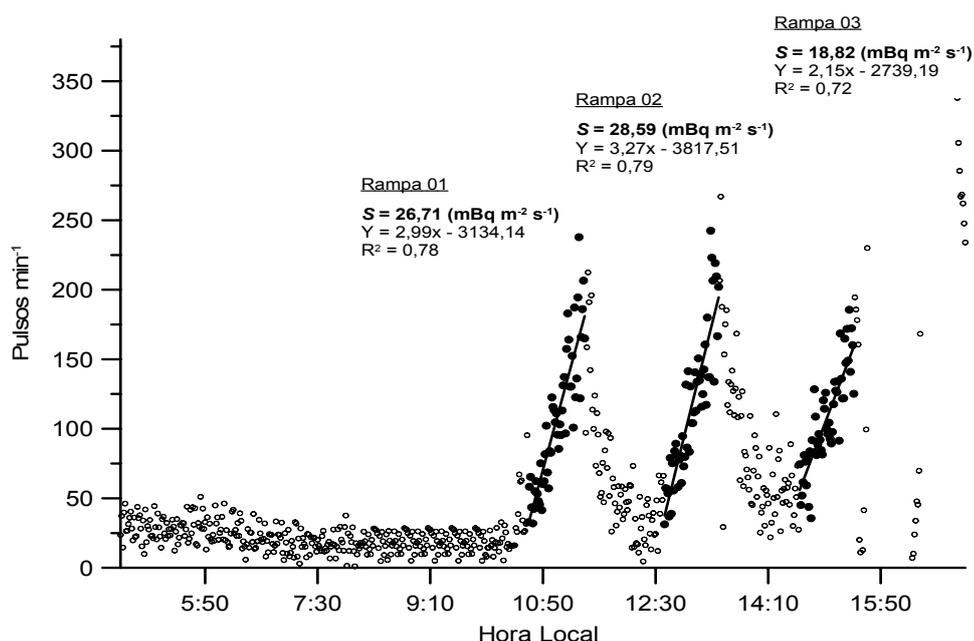


Figura 16 – Exemplo do registro do fluxo do solo (S) com 3 amostras. No gráfico, cada ponto (círculo vazio) representa o total de pulsos registrados pelo detector em um minuto e as rampas (círculo preenchidos) representam a relação linear entre o aumento da concentração e o tempo decorrido do fechamento da câmara

4.2.4 Análises estatísticas

As variáveis foram analisadas quanto à distribuição dos dados através de testes estatísticos disponíveis no software MINITAB 15.1.0.0. Como nenhuma das variáveis apresentou distribuição normal foram aplicados testes não-paramétricos para determinação das diferenças nos parâmetros avaliados. O nível de significância (p) adotado foi $\leq 0,05$. Os gráficos foram feitos com o auxílio dos softwares SIGMA PLOT 8.0 e GRAPHER.

Correlações lineares entre os valores da atividade de ^{222}Rn e da concentração de CH_4 , assim como as correlações entre o fluxo de CH_4 do solo e a atividade de ^{222}Rn próximo ao solo (0,3m) foram utilizadas na determinação de coeficientes usados no exercício de inferência do fluxo de CH_4 do solo e concentração ao longo do perfil, apresentado neste trabalho.

4.3 Resultados e discussão

4.3.1 Fluxo de ^{222}Rn do solo na Floresta Nacional do Tapajós (km 67 e km 83) e na área agrícola (km 77)

Durante o período entre agosto de 2000 a dezembro de 2002 o fluxo de ^{222}Rn do solo nas três áreas estudadas variou entre 6,86 e 103,30 $\text{mBq m}^{-2} \text{s}^{-1}$. A média geral para o período foi igual a $32,48 \pm 14,00 \text{ mBq m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Não se observou variação interanual significativa entre as áreas estudadas, com exceção da área de corte seletivo de madeira (km 83) que apresentou diferença entre o ano de 2000 e os demais anos (Figura 17). Esta diferença pode ser atribuída ao menor período amostrado ao longo do ano (agosto a dezembro) e conseqüentemente menor número de amostras analisadas.

Os valores médios anuais de fluxo de ^{222}Rn do solo estão na mesma faixa de variação (14 a 44 $\text{mBq m}^{-2} \text{s}^{-1}$) encontrada em outros estudos realizados no hemisfério sul (SCHERY et al., 1989; TRUMBORE et al., 1990; SOMASHEKARAPPA et al., 1996; WHITTLESTONE et al., 1998).

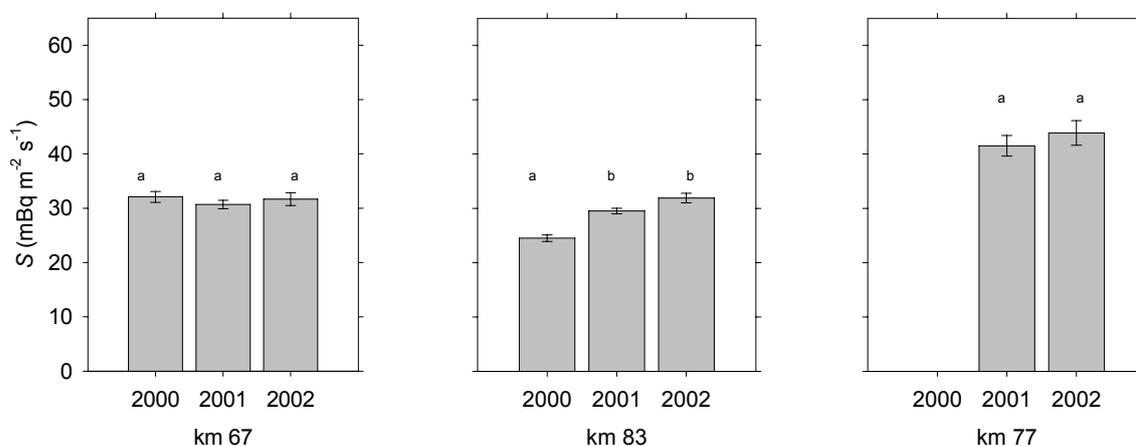


Figura 17 – Variação anual do fluxo de ^{222}Rn do solo nos diferentes ecossistemas estudados. Os dados representam as médias (\pm erro padrão) dos valores para as amostras coletadas durante cada ano. Letras diferentes sobre as barras representam diferenças significativas entre as médias anuais

Também é possível observar uma variação sazonal no fluxo de ^{222}Rn do solo, a qual se apresenta em fase com a variação da umidade do solo no locais estudados (Figura 18). Durante a estação seca (agosto - novembro) quando a umidade do solo cai, o fluxo de ^{222}Rn do solo, inversamente, tende a aumentar

independentemente da área de estudo, e a maioria dos valores observados apresentaram-se acima ou muito próximos da média anual.

Contrariamente, durante o período de maior precipitação na região (março-junho) as médias mensais de fluxo apresentam uma diminuição o que mostra o controle da umidade do solo sobre o fluxo do gás. O valor médio observado nesta estação foi igual a $28,04 \pm 11,10 \text{ mBq m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, este valor é maior que o valor ($14,06 \pm 2,59 \text{ mBq m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) encontrado por Trumbore et al. (1990) durante a estação chuvosa em uma floresta similar em Manaus-AM. Alguns estudos tem demonstrado que o aumento da umidade do solo contribui para diminuição da difusibilidade dos gases devido a diminuição do espaço nos poros do solo disponíveis para o transporte de gases, o que por sua vez, provocaria a redução na taxa de emissão do ^{222}Rn (UCHIDA et al., 1997; CONEN; ROBERTSON, 2002; MARTENS et al., 2004).

O fluxo do solo variou espacialmente entre áreas, sendo mais elevado na área agrícola (km 77) ($p = 0,000$), e praticamente igual nas áreas de florestas (Figura 17). Além da provável diminuição da umidade do solo, o revolvimento do solo para o plantio de arroz e soja pode ter contribuído para o aumento do fluxo de ^{222}Rn no solo da área agrícola. Ielsch et al.(2002) afirmam que mudanças na estrutura do solo alteram o fluxo de ^{222}Rn . Assim, a aragem do solo na área agrícola pode também ter influenciado no aumento da difusibilidade do ^{222}Rn no solo, promovendo consequentemente, o aumento das taxas de emissão desse gás nessa área.

Ressalta-se que todas as medidas de fluxo do solo foram feitas ao longo do dia, principalmente entre 9:00 e 15:00h, período em que se observa a maior amplitude na variação da atividade de ^{222}Rn no perfil vertical (Figura 19). Assim, as médias mensais apresentadas podem não representar fielmente a variação diária no fluxo de ^{222}Rn do solo. Preferencialmente, tais medidas deveriam ser realizadas em intervalos regulares ao longo de todo dia, incluindo medidas noturnas.

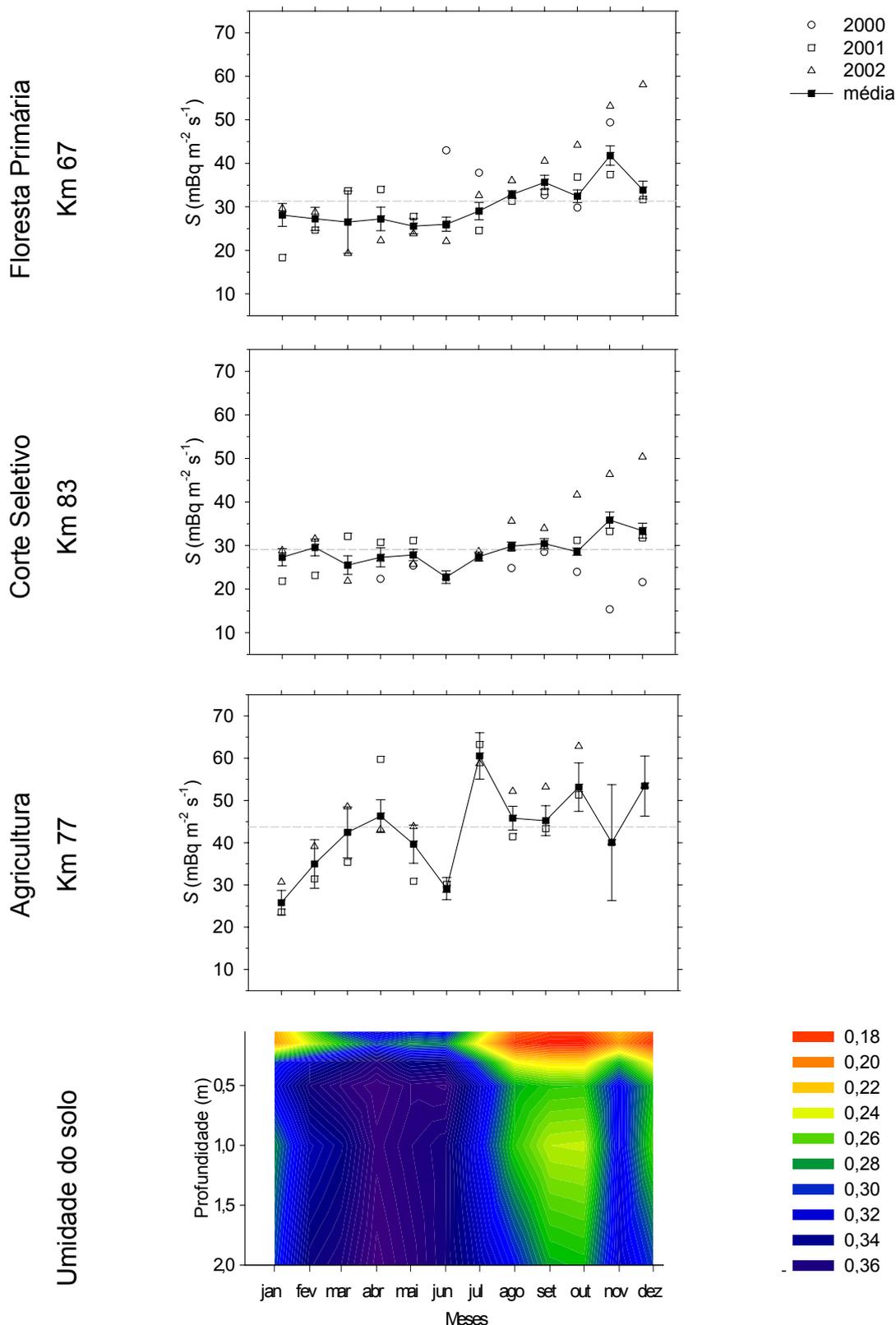


Figura 18 – Variação sazonal do fluxo de ^{222}Rn do solo nos diferentes ecossistemas estudados. Os dados representam as médias mensais (\pm erro padrão) dos valores para as amostras coletadas. A linha cinza pontilhada representa a média interanual observada em cada área estudada. O gráfico inferior apresenta a umidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) no perfil do solo no km67 (Oliveira, R.C., EMBRAPA, dados não publicados)

4.3.2 Atividade de ^{222}Rn no perfil vertical da floresta

Os valores da atividade de ^{222}Rn medidos durante todo o período entre maio de 2000 e dezembro de 2002 foram utilizados para calcular a variação da atividade em um ciclo diário, ilustrado a seguir (Figura 19 A, B, C). Foram calculadas as médias da atividade para todos os dias do ano e em seguida, calculadas as médias a cada 15 minutos.

Os valores da atividade de ^{222}Rn (médias a cada 15 minutos) variaram no perfil vertical da floresta de 5,27 a 18,17 Bq m^{-3} , de 3,55 a 24,02 Bq m^{-3} e entre 3,36 e 18,30 Bq m^{-3} durante os anos de 2000, 2001 e 2002, respectivamente.

A amplitude de variação observada neste estudo é similar a variação observada por Levin et al. (1999) em uma estação experimental em Heidelberg na Alemanha, onde a atividade de ^{222}Rn atinge valores de até 30 Bq m^{-3} . Morrizumi et al. (1996) também mediram em uma área urbana de Nagoya no Japão valores da atividade nessa faixa de variação.

No perfil vertical de floresta a atividade de ^{222}Rn é maior nas primeiras alturas amostradas (0,3m e 1,0m). Isso ocorre provavelmente devido a proximidade com o solo, principal fonte de ^{222}Rn . Contrariamente, à altura de 61 m, foram registrados os menores valores da atividade de ^{222}Rn (Figura 19) o que se deve ao efeito do distanciamento em relação ao solo e ao efeito da maior velocidade do vento nesse compartimento.

Uma característica peculiar observada no ciclo diário da atividade de ^{222}Rn é a diminuição da atividade na maioria das alturas amostradas durante período entre 12:00 e 13:00h do dia (Figura 19). Embora neste período do dia seja esperado um aumento na atividade de ^{222}Rn devido às condições favoráveis para emissão deste gás pelo solo (menor teor de umidade e maior aeração do solo), os resultados observados, curiosamente, refletem uma diminuição da atividade. Este comportamento acontece provavelmente em função do aumento da turbulência ao longo do perfil da floresta (MILLER et al., 2007), o que mudaria as taxas de mistura dos gases resultando na diminuição da atividade medida. Esta “diluição” teria efeito antagônico ao possível aumento das taxas de fluxo do solo esperado para esse horário.

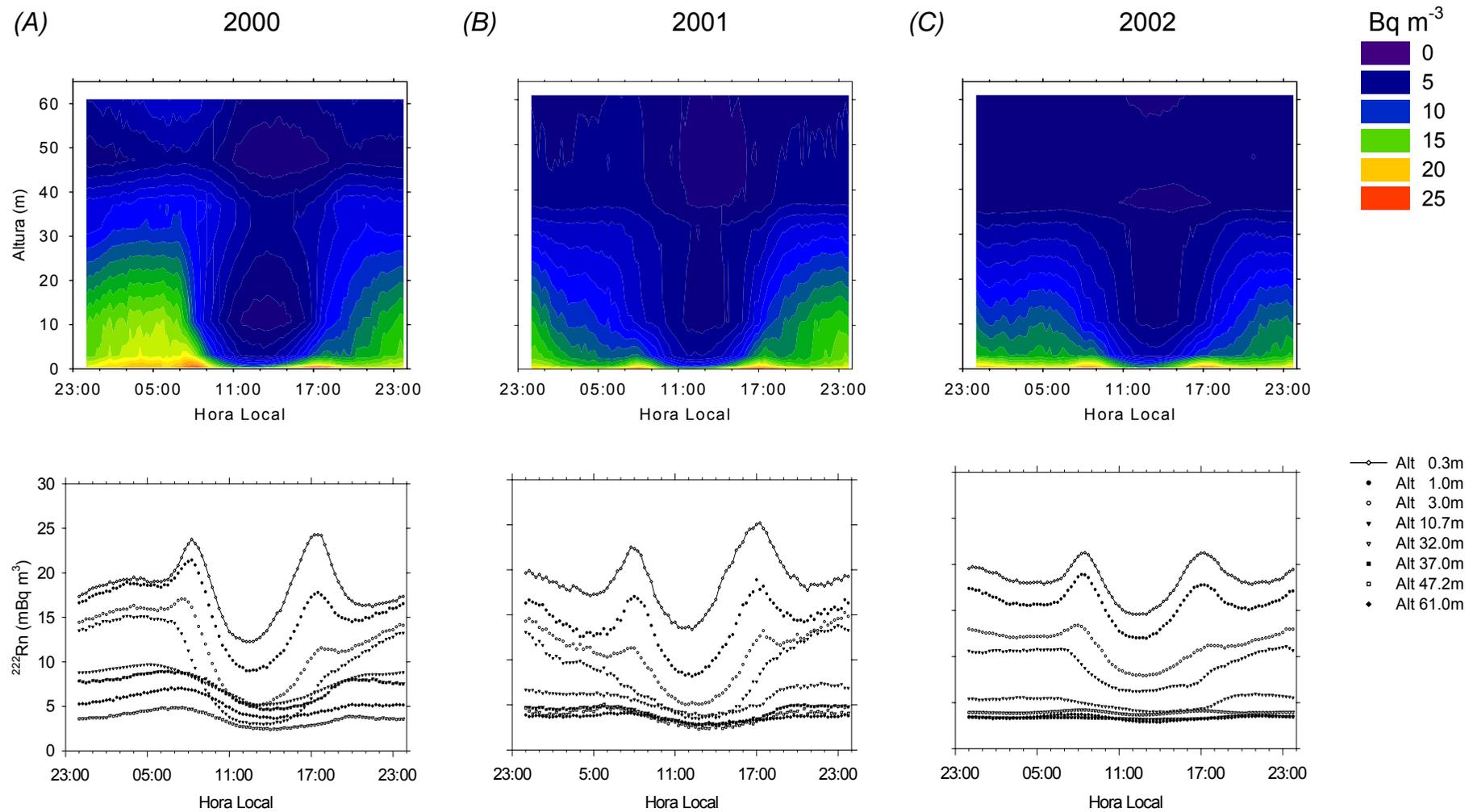


Figura 19 – Atividade de ^{222}Rn no perfil vertical da Floresta Nacional do Tapajós, km 67. Os dados representam as médias da atividade por altura, medidas a cada 15 minutos durante os anos de 2000, 2001 e 2002

Para verificar a influência das estações do ano na atividade de ^{222}Rn no perfil vertical da floresta calculou-se a atividade mediana para cada uma das alturas do perfil durante um mês representativo da estação chuvosa (maio) e outro representativo da estação seca (setembro) (Figura 20).

De um modo geral, nessa comparação, a atividade variou ao longo do perfil entre 2,42 e 23,53 Bq m^{-3} e não houve diferença entre os anos comparados ($p=0,829$). Na estação chuvosa a atividade variou entre 3,58 e 15,96 Bq m^{-3} . Como esperado, na estação seca observou-se uma maior variação, 3,30 e 21,75 Bq m^{-3} , no entanto, os maiores valores observados no período seco não evidenciam diferença estatística entre as estações.

Curiosamente, os valores mínimos foram encontrados na estação seca (Figura 20). Esses valores correspondem sempre à maior altura amostrada (61,0m, a qual está bem acima da copa da floresta) e mostram o efeito do vento na diminuição da atividade medida acima do dossel da floresta. Na estação seca, a maior ventilação ocasiona mudanças na “rugosidade aerodinâmica” do dossel da floresta contribuindo assim para diminuição da atividade de ^{222}Rn acima deste ponto. Por outro lado, nesse período, devido ao aumento da temperatura e menor umidade do solo, o que muda a difusibilidade dos gases, ocorre um aumento no fluxo de ^{222}Rn do solo e isso se reflete como o aumento visto nas primeiras alturas do perfil (Figura 20).

Na estação chuvosa ocorre o fenômeno inverso. Nas alturas inferiores do perfil uma menor atividade de ^{222}Rn em relação aos níveis superiores do perfil é observada. Essa menor atividade decorre da menor contribuição do solo que neste período apresenta as menores taxas de fluxo de ^{222}Rn ocasionadas pelos altos níveis de umidade do solo. Enquanto isso, nas alturas superiores a atividade de ^{222}Rn é mais elevada, até mesmo em comparação aos níveis observados no período seco. Isso se deve provavelmente à menor turbulência observada neste período.

Essa inversão de valores da atividade de ^{222}Rn entre os níveis superiores e inferiores dos perfis de floresta de acordo com a estação do ano foi significativa. A comparação entre os valores da atividade de ^{222}Rn medida nas diferentes alturas do perfil de floresta nos períodos selecionados é apresentada na Tabela 10. Nota-se a altura 10,7m constitui-se como ponto inversão visto que não ocorre diferença no valor da atividade entre o período chuvoso (maio) e seco (setembro).

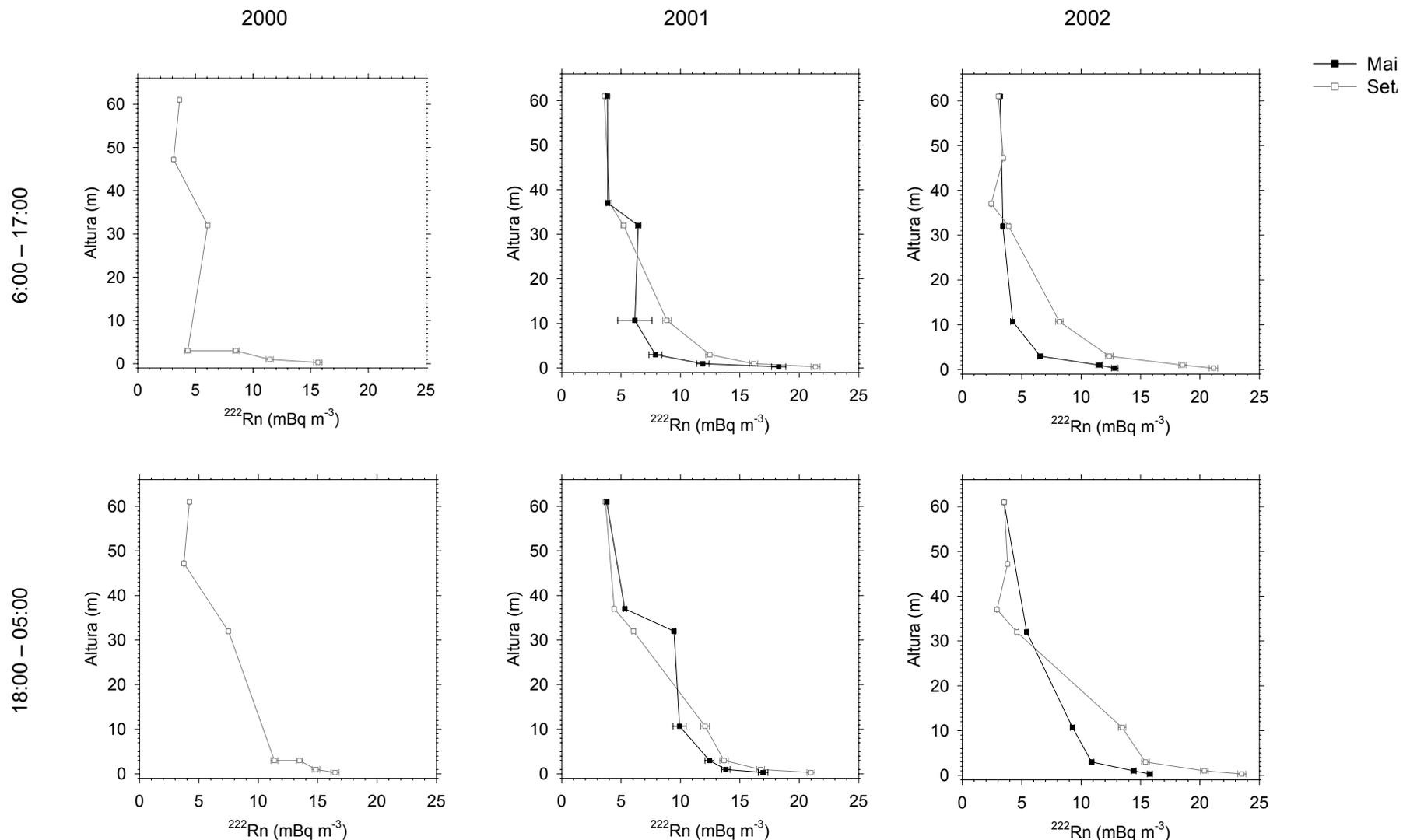


Figura 20 – Atividade de ^{222}Rn no perfil vertical da Floresta Nacional do Tapajós, km 67. Os dados representam as medianas da atividade medida ao longo do perfil durante os meses de maio e setembro (2000, 2001 e 2002). Os gráficos superiores correspondem ao período diurno e os inferiores ao período noturno.

Tabela 10 – Valores médios ($\bar{\chi}$)³⁴ e desvio padrão (σ) da atividade de ²²²Rn medida em diferentes alturas do perfil vertical da torre na Floresta Nacional do Tapajós, durante os meses de maio e setembro de 2001

Mês		Altura no perfil vertical da floresta							
		0,3m	1,0m	3,0m	10,7m	32,0m	37,0m	47,2m ³⁵	61m
maio	$\bar{\chi}$ (Bq m ⁻³)	18,39	14,04	11,69	9,95	8,06	4,89	-	4,02
	σ (Bq m ⁻³)	5,75	4,86	5,38	4,39	2,57	1,63	-	1,73
setembro	$\bar{\chi}$ (Bq m ⁻³)	21,45	16,27	12,80	10,63	6,16	4,67	-	3,81
	σ (Bq m ⁻³)	6,23	5,74	6,23	6,26	3,00	2,19	-	1,61
<i>Kruskal-Wallis</i> (<i>p</i>)		0,00	0,00	0,02	0,71	0,00	0,00	-	0,14

4.3.3 Inferência da concentração e fluxo de CH₄ a partir de medidas diretas da atividade de ²²²Rn

Como o banco de dados completo sobre os perfis verticais de concentração de CH₄ obtido durante o Projeto LBA-ECO ainda não está disponível, foi realizado um exercício comparativo entre as medidas da atividade de ²²²Rn (dados de 2002) e medidas da concentração no perfil vertical da floresta e de fluxo de CH₄ do solo (obtidas em 2007), apresentadas no primeiro capítulo deste manuscrito. Este exercício se constituiu pelo estabelecimento de equações lineares obtidas através das correlações entre estas medidas.

A Figura 21-A mostra a variação da atividade de ²²²Rn no perfil vertical da Floresta Nacional do Tapajós medida durante 3 dias na estação seca de 2002 (22-24/10/02) nas alturas de 0,2m, 7,0m, 35,0m e 45,0m. Os valores observados estão na faixa de variação entre 0,81 e 39,28 Bq m⁻³ e os valores médios variaram entre 2,78 e 20,47 Bq m⁻³. De modo similar ao observado na Figura 19, a atividade de ²²²Rn tende a diminuir com a altura do perfil devido ao distanciamento da fonte de ²²²Rn, que é o solo.

³⁴ Com exceção das alturas 10,7m e 32,0, cujo número de amostras no mês de maio foi igual a 45 e 236, respectivamente, todas as demais alturas tiveram número de amostras iguais a 252 no mês de maio e 609 no mês de setembro.

³⁵ Nenhuma medida foi realizada na altura 47,2m durante os meses de maio e setembro de 2001.

Na Figura 21-B estão apresentados os valores da concentração de CH₄ observados também na época seca (outubro) do ano de 2007. Inversamente, a concentração de CH₄ tende a diminuir com a proximidade do solo visto que este atua como sorvedouro deste gás. Os valores de concentração de CH₄ ao longo do perfil estão na faixa de variação entre 2,08 e 2,25 ppmv e os valores médios para alturas medidas variaram entre 2,17 e 2,22 ppmv.

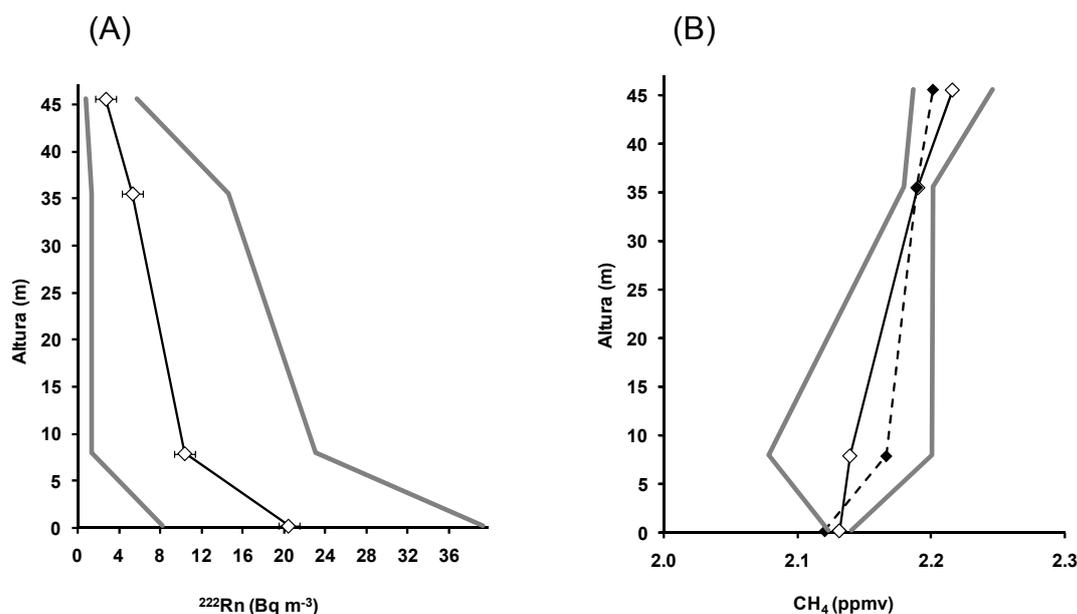


Figura 21 – Perfis verticais da atividade de ²²²Rn (A) e concentração de CH₄ (B) medidos na Flona Tapajós nos períodos entre 22-24/10/02 e 22-24/10/07, respectivamente. As linhas pretas representam os valores médios referentes às alturas 0,2m, 7,0m, 35,0m e 45,0m. As linhas cinzas representam os valores máximo e mínimo observados. A linha tracejada representa a estimativa para concentração de CH₄ com base na interpolação linear entre a concentração de CH₄ e a atividade de ²²²Rn observadas

Observa-se uma correlação inversa entre a atividade de ²²²Rn e a concentração de CH₄ ao longo do perfil vertical da floresta ($p=0,0001$) o que permite a inferência da concentração de CH₄ ao longo do perfil baseado na equação da reta desta correlação. Ainda na Figura 21-B é mostrada a estimativa da concentração de CH₄ no perfil vertical modelada. Esta estimativa apresentou variação semelhante à variação medida por cromatografia gasosa ao longo do perfil vertical.

Com base no mesmo princípio utilizado para a modelagem da concentração de CH₄ ao longo do perfil vertical (Figura 21-B) também foi possível estimar o fluxo de CH₄ do solo. As medidas de fluxo realizadas ao longo do dia (ver Figura 8,

capítulo 1) na estação seca foram correlacionadas com os valores da atividade de ^{222}Rn medidos na altura mais próxima ao solo (0,3m) no perfil da torre de fluxo na floresta primária (F.N.T.).

A Figura 22 mostra a comparação entre a estimativa do fluxo de CH_4 do solo medida através de câmaras estáticas/cromatografia gasosa com a estimativa modelada com base na atividade de ^{222}Rn . O modelo usado não subestima o fluxo de CH_4 apesar de apresentar valores menores de fluxo potencial. Embora a correlação encontrada entre as duas variáveis não tenha sido tão forte ($p= 0,04$) quanto àquela encontrada na comparação entre as medidas no perfil vertical é possível calcular o fluxo esperado de CH_4 ao longo do dia.

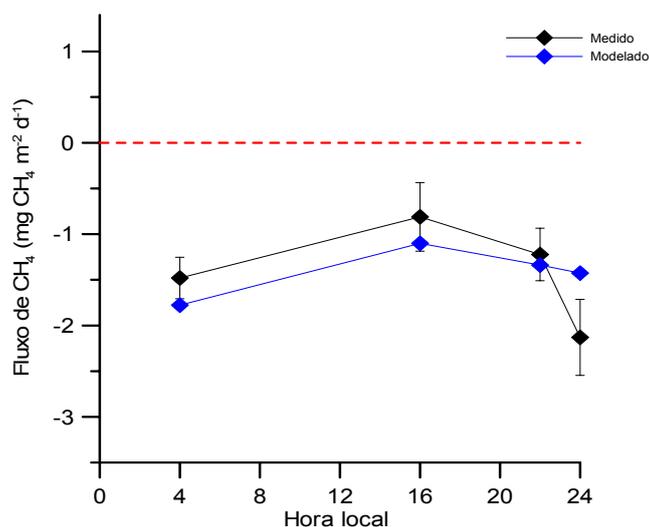


Figura 22 – Fluxo de CH_4 do solo na F.N.T.. A linha preta representa os valores médios de fluxo medidos durante a estação seca. A linha azul representa a estimativa para o fluxo de CH_4 modelada com base na interpolação linear entre o fluxo medido e a atividade de ^{222}Rn medida à altura de 0,3m

4.4 Conclusão

O estudo da atividade de ^{222}Rn no perfil vertical de floresta primária, assim como as investigações sobre as taxas de fluxo do solo deste gás trouxe valiosas informações que podem contribuir tanto para o entendimento das variações espaciais e sazonais nas emissões deste gás, quanto para o estabelecimento de métodos para sua utilização na determinação indireta de balanços de gases efeito estufa.

O fluxo de ^{222}Rn nos três sítios estudados variou sazonalmente apresentando maiores taxas de emissão durante os períodos mais secos do ano. A umidade teve efeito direto na difusibilidade sendo um dos principais controladores do fluxo de ^{222}Rn nas áreas estudadas. O uso e cobertura do solo, especialmente no que diz respeito às modificações na estrutura física do solo, também tem papel importante na determinação das taxas de fluxo e de ^{222}Rn . Na área agrícola estudada, onde a aragem do solo é uma prática comum, o fluxo foi maior em relação às áreas de florestas.

Este estudo mostrou que as variações espaciais e sazonais observadas tanto no fluxo de solo como na atividade de ^{222}Rn no perfil, decorrem da interação de fatores físicos e ambientais (níveis de umidade, turbulência, etc) inerentes ao ecossistema.

As correlações entre a atividade de ^{222}Rn e as medidas da concentração de CH_4 podem constituir-se em uma alternativa viável para o estabelecimento de um método para inferência da concentração e fluxo de CH_4 em florestas tropicais. No entanto, o estabelecimento dos métodos para o uso destas correlações ainda necessita um certo grau de aprimoramento.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Dado ao fato que, as medidas apresentadas neste trabalho foram de certa forma, as primeiras medidas realizadas na Amazônia, é grande a contribuição deste trabalho para o conhecimento das fontes de CH₄ e ao entendimento das causas de suas variações nas florestas de terra-firme da Amazônia. O uso da metodologia isotópica para caracterização das fontes potenciais de CH₄ se mostrou eficaz no sentido de que permitiu inferências sobre a contribuição de processos de produção deste gás nos compartimentos da floresta e do entorno, assim como permitiu compreender os processos determinantes da variação sazonal observada.

Aliada às informações obtidas pelo emprego da técnica isotópica ao estudo de CH₄, o emprego de traçadores das trocas gasosas (como o ²²²Rn, por exemplo) em ecossistemas florestais aparece como uma alternativa viável, do ponto de vista econômico e da precisão das medidas, para o estabelecimento de balanços de gases de efeito de estufa. No entanto, ainda é preciso avançar muito no sentido de estabelecer os métodos pelos quais as medidas do fluxo e da atividade de ²²²Rn podem ser usadas para a inferência indireta de fluxos de CH₄.

Desta forma, a combinação da informação qualitativa oferecida pela técnica isotópica sobre as fontes de CH₄ e aumento da capacidade de inferência dos fluxos deste gás dada pelo uso do ²²²Rn como traçador, irão no futuro auxiliar no entendimento dos balanços regionais deste gás nos ecossistemas amazônicos.

REFERÊNCIAS

ACEVEDO, O.C.; MORAES, O.L.L.; DA SILVA, R.; FITZJARRALD, D.R.; SAKAI, R.K.; STAEBLER, R.M.; CZIKOWSKY, M.J. Inferring nocturnal surface fluxes from vertical profiles of scalars in an Amazon pasture. **Global Change Biology**, Oxford. v.10, n.5, p.886-894, May, 2004.

ANDERSEN, B.L. Modeling isotopic fractionation in systems with multiple sources and sinks with application to atmospheric CH₄. **Global Biogeochemical Cycles**, Washington. v.10, n.1, p.191-196, Mar., 1996.

ARAUJO, A.C.; NOBRE, A.D.; KRUIJT, B.; ELBERS, J.A.; DALLAROSA, R.; STEFANI, P.; VON RANDOW, C.; MANZI, A.O.; CULF, A.D.; GASH, J.H.C.; VALENTINI, R.; KABAT, P. Comparative measurements of carbon dioxide fluxes from two nearby towers in a central Amazonian rainforest: The Manaus LBA site. **Journal of Geophysical Research-Atmospheres**, Washington. v.107, n.D20, Sep-Oct, 2002.

AUVINEN, A.; PERSHAGEN, G. Indoor radon and deaths from lung cancer. **British Medical Journal**, London. v.338, Jan, 2009.

BAKER, T.R.; PHILLIPS, O.L.; MALHI, Y.; ALMEIDA, S.; ARROYO, L.; DI FIORE, A.; ERWIN, T.; HIGUCHI, N.; KILLEEN, T.J.; LAURANCE, S.G.; LAURANCE, W.F.; LEWIS, S.L.; MONTEAGUDO, A.; NEILL, D.A.; VARGAS, P.N.; PITMAN, N.C.A.; SILVA, J.N.M.; MARTINEZ, R.V. Increasing biomass in Amazonian forest plots. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B-Biological Sciences**, London. v.359, n.1443, p.353-365, Mar, 2004.

BALDOCCHI, D.D.; VERMA, S.B.; MATT, D.R.; ANDERSON, D.E. Eddy-correlation measurements of carbon-dioxide efflux from the floor of a deciduous forest. **Journal of Applied Ecology**, Oxford. v.23, n.3, p.967-975, Dec, 1986.

BARTLETT, K.B.; CRILL, P.M.; SEBACHER, D.I.; HARRISS, R.C.; WILSON, J.O.; MELACK, J.M. Methane flux from the Central Amazonian floodplain. **Journal of Geophysical Research-Atmospheres**, Washington. v.93, n.D2, p.1571-1582, Feb., 1988.

BETTS, R.; SANDERSON, M.; WOODWARD, S. Effects of large-scale Amazon forest degradation on climate and air quality through fluxes of carbon dioxide, water, energy, mineral dust and isoprene. **Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences**, London. v.363, n.1498, p.1873-1880, May, 2008.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. **Inventário brasileiro das emissões e remoções antrópicas de gases de efeito estufa**. Brasília, 2009. 19p.

BRENNINKMEIJER, C.A.M.; LOWE, D.C.; MANNING, M.R.; SPARKS, R.J.; VAN VELTHOVEN, P.F.J. The ¹³C, ¹⁴C, and ¹⁸O isotopic composition of CO, CH₄, and CO₂ in the higher southern latitudes lower stratosphere. **Journal of Geophysical Research-Atmospheres**, Washington. v.100, n.D12, p.26163-26172, Dec., 1995.

BUTENHOFF, C.L.; KHALIL, M.A.K. Global methane emissions from terrestrial plants. **Environmental Science & Technology**, Washington. v.41, n.11, p.4032-4037, Jun, 2007.

BUTTERWECK, G.; REINEKING, A.; KESTEN, J.; PORSTENDORFER, J. The use of the natural radioactive noble-gases Radon and Thoron as tracers for the study of turbulent exchange in the atmospheric boundary-layer - Case-study in and above a wheat field. **Atmospheric Environment**, Oxford. v.28, n.12, p.1963-1969, Jul, 1994.

CANOBA, A.; LOPEZ, F.O.; ARNAUD, M.I.; OLIVEIRA, A.A.; NEMAN, R.S.; HADLER, J.C.; IUNES, P.J.; PAULO, S.R.; OSORIO, A.M.; APARECIDO, R.; RODRIGUEZ, C.; MORENO, V.; VASQUEZ, R.; ESPINOSA, G.; GOLZARRI, J.I.; MARTINEZ, T.; NAVARRETE, M.; CABRERA, I.; SEGOVIA, N.; PENA, P.; TAMEZ, E.; PEREYRA, P.; LOPEZ-HERRERA, M.E.; SAJO-BOHUS, L. Indoor radon measurements and methodologies in Latin American countries. **Radiation Measurements**, Oxford. v.34, n.1-6, p.483-486, Jun, 2001.

CANTRELL, C.A.; SHETTER, R.E.; McDANIEL, A.H.; CALVERT, J.G.; DAVIDSON, J.A.; LOWE, D.C.; TYLER, S.C.; CICERONE, R.J.; GREENBERG, J.P. Carbon kinetic isotope effect in the oxidation of methane by the hydroxyl radical. **Journal of Geophysical Research-Atmospheres**, Washington. v.95, n.D13, p.22455-22462, Dec., 1990.

CARMO, J.B.; KELLER, M.; DIAS, J.D.; DE CAMARGO, P.B.; CRILL, P. A source of methane from upland forests in the Brazilian Amazon. **Geophysical Research Letters**, Washington. v.33, n.4, Feb, 2006.

CARSWELL, F.E.; COSTA, A.L.; PALHETA, M.; MALHI, Y.; MEIR, P.; COSTA, J.D.R.; RUIVO, M.D.; LEAL, L.D.M.; COSTA, J.M.N.; CLEMENT, R.J.; GRACE, J. Seasonality in CO₂ and H₂O flux at an eastern Amazonian rain forest. **Journal of Geophysical Research-Atmospheres**, Washington. v.107, n.D20, Sep-Oct, 2002.

CATTANIO, J.H.; DAVIDSON, E.A.; NEPSTAD, D.C.; VERCHOT, L.V.; ACKERMAN, I.L. Unexpected results of a pilot throughfall exclusion experiment on soil emissions of CO₂, CH₄, N₂O, and NO in eastern Amazonia. **Biology and Fertility of Soils**, New York. v.36, n.2, p.102-108, Sep, 2002.

CERRI, C.C.; MAIA, S.M.F.; GALDOS, M.V.; CERRI, C.E.P.; FEIGL, B.J.; BERNOUX, M. Brazilian greenhouse gas emissions: The importance of agriculture and livestock. **Science Agricola**, Piracicaba. v.66, n.6, p.831-843, December, 2009.

CHANTON, J.; CHASER, L.; GLASSER, P.; SIEGEL, D. Carbon and hydrogen isotopic effects in microbial methane from terrestrial environments. In: FLANAGAN, L.B., EHLERINGER, J.R. e PATAKI, D.E. (Ed.). **Stable isotopes and biosphere-atmosphere interactions: Processes and biological controls**. Salt Lake City: Elsevier Academic Press. 2004. cap.6, p.85-105.

CHANTON, J.P.; RUTKOWSKI, C.M.; SCHWARTZ, C.C.; WARD, D.E.; BORING, L. Factors influencing the stable carbon isotopic signature of methane from combustion and biomass burning. **Journal of Geophysical Research-Atmospheres**, Washington. v.105, n.D2, p.1867-1877, Jan., 2000.

CHEN, C.; THOMAS, D.M.; GREEN, R.E. Modeling of Radon Transport in Unsaturated Soil. **Journal of Geophysical Research-Solid Earth**, Washington 100, n.B8, p.15517-15525, Aug, 1995.

CONEN, F.; ROBERTSON, L.B. Latitudinal distribution of radon-222 flux from continents. **Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology**, Copenhagen. v.54, n.2, p.127-133, Apr, 2002.

CONNY, J.M.; CURRIE, L.A. The isotopic characterization of methane, non-methane hydrocarbons and formaldehyde in the troposphere. **Atmospheric Environment**, Oxford, UK. v.30, n.4, p.621-638, Feb., 1996.

COSTA, L.A. **Caracterização e classificação dos solos e dos ambientes da Estação Científica Ferreira Penna, Melgaço, Caxiuanã – Pa.** 2002. 62 p. Dissertação (Mestrado) - Departamento de solos, Faculdade de Ciências Agrárias do Pará. Belém. 2002

CRILL, P.; KELLER, M.; SILVA, H.; DIAS, J.D.; ALBUQUERQUE, S.; CZEPIEL, P.; OLIVEIRA, R.C. Trace gas fluxes from through-canopy measurements in an upland forest of the Eastern Brazilian Amazon. In: LBA-ECO 11th Science Team Meeting. Salvador. 2007.

DA ROCHA, H.R.; GOULDEN, M.L.; MILLER, S.D.; MENTON, M.C.; PINTO, L.D.V.O.; DE FREITAS, H.C.; FIGUEIRA, A.M.E.S. Seasonality of water and heat fluxes over a tropical forest in eastern Amazonia. **Ecological Applications**, Washington. v.14, n.4, p.S22-S32, Aug, 2004.

DAVIDSON, E.A.; ARTAXO, P. Globally significant changes in biological processes of the Amazon Basin: results of the Large-scale Biosphere-Atmosphere Experiment. **Global Change Biol**, Oxford. v.10, n.5, p.519-529, May, 2004.

DAVIDSON, E.A.; DE CARVALHO, C.J.R.; FIGUEIREDO, R. **LBA-ECO ND-02 rainfall exclusion experiment trace gas emissions, TNF, Pará: 1998-2005**, 2008. Disponível em: <http://lba.cptec.inpe.br>. Acesso em: 14 de Ago de 2009.

DAVIDSON, E.A.; ISHIDA, F.Y.; NEPSTAD, D.C. Effects of an experimental drought on soil emissions of carbon dioxide, methane, nitrous oxide, and nitric oxide in a moist tropical forest. **Global Change Biology**, Oxford. v.10, n.5, p.718-730, May, 2004.

DAVIDSON, E.A.; NEPSTAD, D.C.; ISHIDA, F.Y.; BRANDO, P.M. Effects of an experimental drought and recovery on soil emissions of carbon dioxide, methane, nitrous oxide, and nitric oxide in a moist tropical forest. **Global Change Biology**, Oxford. v.14, n.11, p.2582-2590, Nov, 2008.

DEFRIES, R.S.; MORTON, D.C.; VAN DER WERF, G.R.; GIGLIO, L.; COLLATZ, G.J.; RANDERSON, J.T.; HOUGHTON, R.A.; KASIBHATLA, P.K.; SHIMABUKURO, Y. Fire-related carbon emissions from land use transitions in southern Amazonia. **Geophysical Research Letters**, Washington. v.35, n.22, 2008.

DEVOL, A.H.; RICHEY, J.E.; FORSBERG, B.R.; MARTINELLI, L.A. Seasonal dynamics in methane emissions from the Amazon River floodplain to the troposphere. **Journal of Geophysical Research-Atmospheres**, Washington. v.95, n.D10, p.16417-16426, Sep., 1990.

DLUGOKENCKY, E.J.; HOUWELING, S.; BRUHWILER, L.; MASARIE, K.A.; LANG, P.M.; MILLER, J.B.; TANS, P.P. Atmospheric methane levels off: Temporary pause or a new steady-state? **Geophysical Research Letters**, Washington. v.30, n.19, Oct., 2003.

DOMINGUES, T.F.; BERRY, J.A.; MARTINELLI, L.A.; OMETTO, J.; EHLERINGER, J.R. Parameterization of canopy structure and leaf-level gas exchange for an eastern Amazonian tropical rain forest (Tapajos National Forest, Para, Brazil). **Earth Interactions**, Boston. v.9, 2005.

DORR, H.; KATRUFF, L.; LEVIN, I. Soil texture parameterization of the methane uptake in aerated soils. **Chemosphere**, Oxford, UK. v.26, n.1-4, p.697-713, Oct, 1993.

DORR, H.; KROMER, B.; LEVIN, I.; MUNNICH, K.O.; VOLPP, H.J. CO₂ and Radon²²² as tracers for atmospheric transport. **Journal of Geophysical Research-Oceans and Atmospheres**, Washington, DC. v.88, n.NC2, p.1309-1313, 1983.

DORR, H.; MUNNICH, K.O. ²²²Rn flux and soil air concentration profiles in West-Germany. Soil ²²²Rn as tracer for gas transport in the unsaturated soil zone. **Tellus B**, Oxford. v.42, n.1, p.20-28, Feb., 1990.

DUEÑAS, C.; FERNÁNDEZ, M.C.; CARRETERO, J.; LIGER, E. Methane uptake in soils of southern Spain estimated by two different techniques: Static chamber and ²²²radon flux and soil air concentration profiles. **Atmospheric Environment**, Oxford, UK. v.30, n.4, p.545-552, Feb, 1996.

ESPÍRITO-SANTO, F.D.B. **Caracterização e mapeamento da vegetação da região da Floresta Nacional do Tapajós através de dados óticos, radar e inventários florestais**. São José dos Campos, 2003. 277p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2003.

ETHERIDGE, D.M.; STEELE, L.P.; FRANCEY, R.J.; LANGENFELDS, R.L. Atmospheric methane between 1000 AD and present: Evidence of anthropogenic emissions and climatic variability. **Journal of Geophysical Research-Atmospheres**, Washington. v.103, n.D13, p.15979-15993, July, 1998.

EVA, H.D.; BELWARD, A.S.; DE MIRANDA, E.E.; DI BELLA, C.M.; GOND, V.; HUBER, O.; JONES, S.; SGRENZAROLI, M.; FRITZ, S. A land cover map of South America. **Global Change Biology**, Oxford. v.10, n.5, p.731-744, May, 2004.

FAN, S.M.; WOFYSY, S.C.; BAKWIN, P.S.; JACOB, D.J.; FITZJARRALD, D.R. Atmosphere-biosphere exchange of CO₂ and O₃ in the Central Amazon forest. **Journal of Geophysical Research-Atmospheres**, Washington. v.95, n.D10, p.16851-16864, Sep, 1990.

FERRETTI, D.F.; MILLER, J.B.; WHITE, J.W.C.; ETHERIDGE, D.M.; LASSEY, K.R.; LOWE, D.C.; MEURE, C.M.M.; DREIER, M.F.; TRUDINGER, C.M.; VAN OMMEN, T.D.; LANGENFELDS, R.L. Unexpected changes to the global methane budget over the past 2000 years. **Science**, Washington. v.309, n.5741, p.1714-1717, Sep 9, 2005.

FIGUEIRA, A.; MILLER, S.D.; DE SOUSA, C.A.D.; MENTON, M.C.; MAIA, A.R.; DA ROCHA, H.R.; GOULDEN, M.L. Effects of selective logging on tropical forest tree growth. **Journal of Geophysical Research-Biogeosciences**, Washington, DC. v.113, 2008.

FINNIGAN, J.J. A re-evaluation of long-term flux measurement techniques - Part II: Coordinate systems. **Boundary-Layer Meteorology**, Dordrecht. v.113, n.1, p.1-41, Oct, 2004.

FINNIGAN, J.J.; CLEMENT, R.; MALHI, Y.; LEUNING, R.; CLEUGH, H.A. A re-evaluation of long-term flux measurement techniques - Part I: Averaging and coordinate rotation. **Boundary-Layer Meteorology**, Dordrecht. v.107, n.1, p.1-48, Apr, 2003.

FITZJARRALD, D.R.; MOORE, K.E. Mechanisms of nocturnal exchange between the rainforest and the atmosphere. **Journal of Geophysical Research-Atmospheres**, Washington. v.95, n.D10, p.16839-16850, Sep, 1990.

FLETCHER, S.E.M.; TANS, P.P.; BRUHWILER, L.M.; MILLER, J.B.; HEIMANN, M. CH₄ sources estimated from atmospheric observations of CH₄ and its ¹³C/¹²C isotopic ratios: 1. Inverse modeling of source processes. **Global Biogeochemical Cycles**, Washington. v.18, n.4, Oct., 2004.

FRANKENBERG, C.; MEIRINK, J.F.; VAN WEELE, M.; PLATT, U.; WAGNER, T. Assessing methane emissions from global space-borne observations. **Science**, Washington. v.308, n.5724, p.1010-1014, May, 2005.

GAUDRY, A.; POLIAN, G.; MONFRAY, P.; ARDOUIN, B.; LAMBERT, G. CO₂ fluxes in sub-antarctic areas from CO₂/Radon correlations. **Chemical Geology**, Amsterdam. v.70, n.1-2, p.98-98, Aug., 1988.

GOULDEN, M.L.; MUNGER, J.W.; FAN, S.M.; DAUBE, B.C.; WOFSEY, S.C. Measurements of carbon sequestration by long-term eddy covariance: Methods and a critical evaluation of accuracy. **Global Change Biology**, Oxford. v.2, n.3, p.169-182, Jun, 1996.

GRACE, J.; LLOYD, J.; MCINTYRE, J.; MIRANDA, A.C.; MEIR, P.; MIRANDA, H.S.; NOBRE, C.; MONCRIEFF, J.; MASSHEDER, J.; MALHI, Y.; WRIGHT, I.; GASH, J. Carbon-dioxide uptake by an undisturbed tropical rain-forest in Southwest Amazonia, 1992 TO 1993. **Science**, Washington. v.270, n.5237, p.778-780, Nov, 1995.

GRAY, A.; READ, S.; MCGALE, P.; DARBY, S. Lung cancer deaths from indoor radon and the cost effectiveness and potential of policies to reduce them. **British Medical Journal**, Oxford. v.338, Jan, 2009.

HANSEN, J.; RUEDY, R.; SATO, M.; IMHOFF, M.; LAWRENCE, W.; EASTERLING, D.; PETERSON, T.; KARL, T. A closer look at United States and global surface temperature change. **Journal of Geophysical Research**, Washington. v.106, N.D20, p.947-963, 2001.

HANSEN, J.; SATO, M. Greenhouse gas growth rates. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, Washington. v.101, n.46, p.16109-16114, Nov, 2004.

HANSEN, J.; SATO, M.; KHARECHA, P.; RUSSELL, G.; LEA, D.W.; SIDDALL, M. Climate change and trace gases. **Philosophical Transactions of the Royal Society a-Mathematical Physical and Engineering Sciences**, London. v.365, n.1856, p.1925-1954, Jul, 2007.

HORNIBROOK, E.R.C.; LONGSTAFFE, F.J.; FYFE, W.S. Factors influencing stable isotope ratios in CH₄ and CO₂ within subenvironments of freshwater wetlands: Implications for d-signatures of emissions. **Isotopes in Environmental and Health Studies**, Oxford, UK. v.36, n.2, p.151-176, 2000.

HOUGHTON, J. The climate convention and the latest scientific understanding of climate change. **Renewable Energy**, Oxford, UK. v.5, n.1/4, p.1-4, Aug., 1994.

HOUGHTON, R.A.; SKOLE, D.L.; NOBRE, C.A.; HACKLER, J.L.; LAWRENCE, K.T.; CHOMENTOWSKI, W.H. Annual fluxes of carbon from deforestation and regrowth in the Brazilian Amazon. **Nature**, London. v.403, n.6767, p.301-304, Jan 20, 2000.

HOUWELING, S.; ROCKMANN, T.; ABEN, I.; KEPPLER, F.; KROL, M.; MEIRINK, J.F.; DLUGOKENCKY, E.J.; FRANKENBERG, C. Atmospheric constraints on global emissions of methane from plants. **Geophysical Research Letters**, Washington. v.33, n.15, Aug, 2006.

IELSCH, G.; FERRY, C.; TYMEN, G.; ROBE, M.C. Study of a predictive methodology for quantification and mapping of the radon-222 exhalation rate. **Journal of Environmental Radioactivity**, Oxford. v.63, n.1, p.15-33, 2002.

INPE/IBAMA/FUNATURA/ITTO. **Forest Inventory**: Tapajós National Forest. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais / Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Naturais; Pro-Nature Foundatione International Tropical Timber, 1992. 26p. (INPE-5423-PRP/171).

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2007: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, 2007. 104p.

ITOH, M.; OHTE, N.; KOKA, K. Methane flux characteristics in forest soils under an East Asian monsoon climate. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, UK. v.41, n.2, p.388-395, Feb, 2009.

JACOBI, W.; ANDRE, K. Vertical distribution of Radon-222, Radon-220 and their decay products in atmosphere. **Journal of Geophysical Research**, Washington. v.68, n.13, 1963.

JONES, P.D.; MOBERG, A. Hemispheric and large-scale surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2001. **Journal of Climate**, Boston. v.16, n.2, p.206-223, Jan, 2003.

JUDD, A.G.; HOVLAND, M.; DIMITROV, L.I.; GIL, S.G.; JUKES, V. The geological methane budget at continental margins and its influence on climate change. **Geofluids**, Oxford, UK. v.2, n.2, p.109-126, May, 2002.

KELLER, M.; MITRE, M.E.; STALLARD, R.F. Consumption of atmospheric methane in soils of Central Panama: Effects of agricultural development. **Global Biogeochemical Cycles**, Washington. v., n.4, p.21-27, 1990.

KELLER, M.; STALLARD, R.F. Methane emission by bubbling from Gatun Lake, Panama. **Journal of Geophysical Research-Atmospheres**, Washington. v.99, n.D4, p.8307-8319, Apr., 1994.

KELLER, M.; VARNER, R.; DIAS, J.D.; SILVA, H.; CRILL, P.; DE OLIVEIRA, R.C.J.; ASNER, G.P. Soil-atmosphere exchange of Nitrous Oxide, Nitric Oxide, Methane, and Carbon Dioxide in logged and undisturbed forest in the Tapajos National Forest, Brazil. **Earth Interactions**, Boston. v.9, n.23, p.1-28, November 1, 2005, 2005.

KEPPLER, F.; HAMILTON, J.T.G.; BRASS, M.; RÖCKMANN, T. Methane emissions from terrestrial plants under aerobic conditions. **Nature**, London. v.439, n.7073, p.187-191, Jan 12, 2006.

KHALIL, M.A.K.; SHEARER, M.J.; RASMUSSEN, R.A. Methane sources in China - Historical and current emissions. **Chemosphere**, Oxford, UK. v.26, n.1-4, p.127-142, Feb., 1993.

KIRSCHBAUM, M.U.F.; BRUHN, D.; ETHERIDGE, D.M.; EVANS, J.R.; FARQUHAR, G.D.; GIFFORD, R.M.; PAUL, K.I.; WINTERS, A.J. A comment on the quantitative significance of aerobic methane release by plants. **Functional Plant Biology**, Victoria. v.33, n.6, p.521-530, 2006.

KIRSCHBAUM, M.U.F.; WALCROFT, A. No detectable aerobic methane efflux from plant material, nor from adsorption/desorption processes. **Biogeosciences**, Kathlenburg-Lindau. v.5, n.6, p.1551-1558, 2008.

KROMER, B.; ROETHER, W. Wind dependence of gas exchange field measurements with the Radon method during Jasin and Fgge. **Bulletin of the American Meteorological Society**, Boston. v.60, n.10, p.1257-1257, 1979.

KUCK, L.R.; SMITH, T.; BALSLEY, B.B.; HELMIG, D.; CONWAY, T.J.; TANS, P.P.; DAVIS, K.; JENSEN, M.L.; BOGNAR, J.A.; ARRIETA, R.V.; RODRIQUEZ, R.; BIRKS, J.W. Measurements of landscape-scale fluxes of carbon dioxide in the Peruvian Amazon by vertical profiling through the atmospheric boundary layer. **Journal of Geophysical Research-Atmospheres**, Washington. v.105, n.D17, p.22137-22146, Sep., 2000.

LARSON, R.E.; HOPPEL, W.A. Radon-222 measurements below km-4 as related to atmospheric convection. **Pure and Applied Geophysics**, Basel. v.105, n.4, p.900-906, 1973.

LASSEY, K.R.; LOWE, D.C.; MANNING, M.R. The trend in atmospheric methane $\delta^{13}\text{C}$ implications for isotopic constraints on the global methane budget. **Global Biogeochemical Cycles**, Washington. v.14, n.1, p.41-49, Mar., 2000.

LEDERER, C.M.; HOLLANDER, J.M.; PERLMAN, I. **Table of Isotopes**. 6th. New York: Wiley & Sons, 1968

LEVIN, I.; GLATZEL-MATTHEIER, H.; MARIK, T.; CUNTZ, M.; SCHMIDT, M.; WORTHY, D.E. Verification of German methane emission inventories and their recent changes based on atmospheric observations. **Journal of Geophysical Research-Atmospheres**, Washington. v.104, n.D3, p.3447-3456, Feb, 1999.

LISBOA, P.L.B.; SILVA, A.S.L.; ALMEIDA, S.S. Florística e estrutura dos ambientes. In: LISBOA, P.L.B. (Ed.). **Caxiuanã**. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, 1997.

LOWE, D.C. Global change: A green source of surprise. **Nature**, London. v.439, n.7073, p.148-149, 2006.

MALHI, Y.; NOBRE, A.D.; GRACE, J.; KRUIJT, B.; PEREIRA, M.G.P.; CULF, A.; SCOTT, S. Carbon dioxide transfer over a Central Amazonian rain forest. **Journal of Geophysical Research-Atmospheres**, Washington. v.103, n.D24, p.31593-31612, Dec, 1998.

MANCINI, L.H.; BONOTTO, D.M. A method for evaluating Ra-228 in environmental matrices and its use at Pocos de Caldas plateau, Brazil. **Applied Radiation and Isotopes**, Oxford, UK. v.57, n.4, p.591-600, Oct., 2002.

MARCHETTINI, N.; MARCHI, M.; TIEZZI, E. Global warming potential revisited. In: BREBBIA, C.A. e TIEZZI, E. (Ed.). **Ecosystems and Sustainable Development VII**. Southampton: Wit Press, 2009. p.3-12.

MARENCO, J.A.; NOBRE, C.A. General characteristics and variability of climate in the Amazon basin and its links to the global climate system. In: MCCLAIN, M.E., VICTORIA, R.L. e RICHEY, J.E. (Ed.). **The biogeochemistry of the Amazon basin**. New York: Oxford University Press, 2001.

MARIK, T.; FISCHER, H.; CONEN, F.; SMITH, K. Seasonal variations in stable carbon and hydrogen isotope ratios in methane from rice fields. **Global Biogeochemical Cycles**, Washington. v.16, n.4, p.41-52, Oct., 2002.

MARTENS, C.S.; BLAIR, N.E.; GREEN, C.D.; DES MARAIS, D.J. Seasonal variations in the stable carbon isotopic signature of biogenic methane in a coastal sediment. **Science**, Washington. v.233, n.4770, p.1300-1303, Sep., 1986.

MARTENS, C.S.; SHAY, T.J.; MENDLOVITZ, H.P.; MATROSS, D.M.; SALESKA, S.; WOFSY, S.C.; WOODWARD, S.; MENTON, M.C.; MOURA, J.M.S.; CRILL, P.; MORAES, O.L.L.; LIMA, R.L. Radon fluxes in tropical forest ecosystems of Brazilian Amazonia: night-time CO_2 net ecosystem exchange derived from radon and eddy covariance methods. **Global Change Biology**, Oxford. v.10, p.1-12, May, 2004.

MASSMAN, W.J.; LEE, X. Eddy covariance flux corrections and uncertainties in long-term studies of carbon and energy exchanges. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam. v.113, n.1-4, p.121-144, Dec, 2002.

MCGRODDY, M.E.; SILVER, W.L.; DE OLIVEIRA, R.C. The effect of phosphorus availability on decomposition dynamics in a seasonal lowland Amazonian forest. **Ecosystems**, New York. v.7, n.2, p.172-179, Mar, 2004.

MELACK, J.M.; HESS, L.L.; GASTIL, M.; FORSBERG, B.R.; HAMILTON, S.K.; LIMA, I.B.T.; NOVO, E.M.L.M. Regionalization of methane emissions in the Amazon Basin with microwave remote sensing. **Global Change Biology**, Oxford. v.10, n.5, p.530-544, May, 2004.

MILLER, J.B. The carbon isotopic composition of atmospheric methane and its constraint on global methane budget. In: FLANAGAN, L.B., EHLERINGER, J.R. e PATAKI, D.E. (Ed.). **Stable isotopes and biosphere-atmosphere interactions: Processes and biological controls**. Salt Lake City: Elsevier Academic Press, cap.16, 2004. p.289-310.

MILLER, J.B.; GATTI, L.V.; D'AMELIO, M.T.S.; CROTWELL, A.M.; DLUGOKENCKY, E.J.; BAKWIN, P.; ARTAXO, P.; TANS, P.P. Airborne measurements indicate large methane emissions from the eastern Amazon basin. **Geophysical Research Letters**, 34, n.10, May, 2007.

MILLER, J.B.; GATTI, L.V.; D'AMÉLIO, M.T.S.; CROTWELL, A.; DLUGOKENCKY, E.; BAKWIN, P.S.; ARTAXO, P.; TANS, P.P. **LBA-ECO TG-06 vertical profiles of trace gases using small aircraft, Amazon Basin**, 2008. Disponível em: <http://lba.cptec.inpe.br>. Acesso em: 28 Ago. de 2009.

MILLER, J.B.; MACK, K.A.; DISSLY, R.; WHITE, J.W.C.; DLUGOKENCKY, E.J.; TANS, P.P. Development of analytical methods and measurements of $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ in atmospheric CH_4 from the NOAA climate monitoring and diagnostics laboratory global air sampling network. **Journal of Geophysical Research-Atmospheres**, Washington. v.107, n.D13, p.11-26, July, 2002.

MILLER, J.B.; TANS, P.P. Calculating isotopic fractionation from atmospheric measurements at various scales. **Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology**, Copenhagen, 55, n.2, p.207-214, Apr., 2003.

MILLER, J.B.; TANS, P.P.; WHITE, J.W.C.; CONWAY, T.J.; VAUGHN, B.W. The atmospheric signal of terrestrial carbon isotopic discrimination and its implication for partitioning carbon fluxes. **Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology**, Copenhagen, 55, n.2, p.197-206, Apr., 2003.

MILLER, S.D.; GOULDEN, M.L.; DA ROCHA, H.R. The effect of canopy gaps on subcanopy ventilation and scalar fluxes in a tropical forest. **Agricultural and Forest Meteorology**, 142, n.1, p.25-34, Jan, 2007.

MILLER, S.D.; GOULDEN, M.L.; MENTON, M.C.; DA ROCHA, H.R.; DE FREITAS, H.C.; FIGUEIRA, A.M.S.; DE SOUSA, C.A.D. Biometric and micrometeorological measurements of tropical forest carbon balance. **Ecological Applications**, Washington. v.14, n.4, p.S114-S126, 2004.

MOONEY, H.A.; VITOUSEK, P.M.; MATSON, P.A. Exchange of materials between terrestrial ecosystems and the atmosphere. **Science**, Washington. v.238, n.4829, p.926-932, Nov, 1987.

MORIIZUMI, J.; NAGAMINE, K.; IIDA, T.; IKEBE, Y. Estimation of areal flux of atmospheric methane in an urban area of Nagoya, Japan, inferred from atmospheric ^{222}Rn data. **Atmospheric Environment**, Oxford, UK. v.30, n.10-11, p.1543-1549, May, 1996.

MORTON, D.C.; DEFRIES, R.S.; RANDERSON, J.T.; GIGLIO, L.; SCHROEDER, W.; VAN DER WERF, G.R. Agricultural intensification increases deforestation fire activity in Amazonia. **Global Change Biology**, Oxford. v.14, n.10, p.2262-2275, 2008.

MOURA, J.M.S.; MARTENS, C.S.; MOREIRA, M.Z.; LIMA, R.L.; SAMPAIO, I.C.G.; MENDLOVITZ, H.P.; MENTON, M.C. Spatial and seasonal variations in the stable carbon isotopic composition of methane in stream sediments of eastern Amazonia. **Tellus B**, Oxford, UK. v.60, n.1, p.21-31, 2008.

NEPSTAD, D.C.; MOUTINHO, P.; DIAS, M.B.; DAVIDSON, E.; CARDINOT, G.; MARKEWITZ, D.; FIGUEIREDO, R.; VIANNA, N.; CHAMBERS, J.; RAY, D.; GUERREIROS, J.B.; LEFEBVRE, P.; STERNBERG, L.; MOREIRA, M.; BARROS, L.; ISHIDA, F.Y.; TOHLVER, I.; BELK, E.; KALIF, K.; SCHWALBE, K. The effects of partial throughfall exclusion on canopy processes, aboveground production, and biogeochemistry of an Amazon forest. **Journal of Geophysical Research-Atmospheres**, Washington. v.107, n.D20, Oct., 2002.

NOBRE, P.; MALAGUTTI, M.; URBANO, D.F.; DE ALMEIDA, R.A.F.; GIAROLLA, E. Amazon deforestation and climate change in a coupled model simulation. **Journal of Climate**, Boston. v.22, n.21, p.5686-5697, Nov, 2009.

OMETTO, J.; FLANAGAN, L.B.; MARTINELLI, L.A.; MOREIRA, M.Z.; HIGUCHI, N.; EHLERINGER, J.R. Carbon isotope discrimination in forest and pasture ecosystems of the Amazon Basin, Brazil. **Global Biogeochemical Cycles**, Washington. v.16, n.4, Dec., 2002.

OMETTO, J.P.H.; FLANAGAN, L.B.; MARTINELLI, L.A.; EHLERINGER, J.R. Oxygen isotope ratios of waters and respired CO_2 in Amazonian forest and pasture ecosystems. **Ecological Applications**, Washington. v.15, n.1, p.58-70, Feb., 2005.

OMETTO, J.P.H.B.; NOBRE, A.D.; DA ROCHA, H.; ARTAXO, P.; MARTINELLI, L.A. Amazonia and the modern carbon cycle: lessons learned. **Oecologia**, New York. v.143, n.4, p.483-500, May, 2005.

PAROTTA, J.A.; FRANCIS, J.K.; DE ALMEIDA, R.R. Trees of the Tapajos: a photographic field guide. Rio Piedras: General Technical Report IITF-1, 1995, 371p

PATTEY, E.; STRACHAN, I.B.; DESJARDINS, R.L.; MASSHEDER, J. Measuring nighttime CO_2 flux over terrestrial ecosystems using eddy covariance and nocturnal boundary layer methods. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam. v.113, n.1-4, p.145-158, Dec, 2002.

PEARMAN, G.I.; FRASER, P.J. Atmospheric Chemistry - Sources of increased methane. **Nature**, London. v.332, n.6164, p.489-490, Apr., 1988.

PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, L.R.; SENTELHAS, P.C. AGROMETEOROLOGIA - Fundamentos e aplicações práticas. Guaíba: Editora Agropecuária, 2002. v.1, 478p.

PETIT, J.R.; JOUZEL, J.; RAYNAUD, D.; BARKOV, N.I.; BARNOLA, J.M.; BASILE, I.; BENDER, M.; CHAPPELLAZ, J.; DAVIS, M.; DELAYGUE, G.; DELMOTTE, M.; KOTLYAKOV, V.M.; LEGRAND, M.; LIPENKOV, V.Y.; LORIUS, C.; PEPIN, L.; RITZ, C.; SALTZMAN, E.; STIEVENARD, M. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. **Nature**, London. v.399, n.6735, p.429-436, June, 1999.

QUAY, P.; KING, S.L.; LANSDOWN, J.; WILBUR, D. Isotopic composition of methane released from wetlands: Implications for the increase in atmospheric methane. **Global Biogeochemical Cycles**, Washington. v.2, n.4, p.385-397, Dec., 1988.

QUAY, P.; STUTSMAN, J.; WILBUR, D.; SNOVER, A.; DLUGOKENCKY, E.; BROWN, T. The isotopic composition of atmospheric methane. **Global Biogeochemical Cycles**, Washington. v.13, n.2, p.445-461, June, 1999.

QUAY, P.D.; KING, S.L.; STUTSMAN, J.; WILBUR, D.O.; STEELE, L.P.; FUNG, I.; GAMMON, R.H.; BROWN, T.A.; FARWELL, G.W.; GROOTES, P.M.; SCHMIDT, F.H. Carbon isotopic composition of atmospheric CH₄: Fossil and biomass burning source strengths. **Global Biogeochemical Cycles**, Washington, DC. v.5, 1991.

RADAMBRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. Folha AS.22-Belém. Geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. In: (Ed.). Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Produção Mineral, 1974. p.510.

RADAMBRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. Folha AS.21-Santarém. Geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. In: (Ed.). Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Produção Mineral, 1976. p.510.

RICHEY, J.E.; HEDGES, J.I.; DEVOL, A.H.; QUAY, P.D.; VICTORIA, R.; MARTINELLI, L.; FORSBERG, B.R. Biogeochemistry of carbon in the Amazon River. **Limnology and Oceanography**, Lawrence. v.35, n.2, p.352-371, Mar., 1990.

RICHEY, J.E.; MELACK, J.M.; AUFDENKAMPE, A.K.; BALLESTER, V.M.; HESS, L.L. Outgassing from Amazonian rivers and wetlands as a large tropical source of atmospheric CO₂. **Nature**, London. v.416, n.6881, p.617-620, Apr., 2002.

SAKAI, R.K.; FITZJARRALD, D.R.; MOORE, K.E. Importance of low-frequency contributions to eddy fluxes observed over rough surfaces. **Journal of Applied Meteorology**, Boston. v.40, n.12, p.2178-2192, 2001.

SAKAI, R.K.; FITZJARRALD, D.R.; MORAES, O.L.L.; STAEBLER, R.M.; ACEVEDO, O.C.; CZIKOWSKY, M.J.; SILVA, R.D.; BRAIT, E.; MIRANDA, V. Land-use change effects on local energy, water, and carbon balances in an Amazonian agricultural field. **Global Change Biol**, Oxford. v.10, n.5, p.895-907, May 01, 2004, 2004.

SALESKA, S.R.; MILLER, S.D.; MATROSS, D.M.; GOULDEN, M.L.; WOFYSY, S.C.; DA ROCHA, H.R.; DE CAMARGO, P.B.; CRILL, P.; DAUBE, B.C.; DE FREITAS, H.C.; HUTYRA, L.; KELLER, M.; KIRCHHOFF, V.; MENTON, M.; MUNGER, J.W.; PYLE, E.H.; RICE, A.H.; SILVA, H. Carbon in amazon forests: Unexpected seasonal fluxes and disturbance-induced losses. **Science**, Washington. v.302, n.5650, p.1554-1557, Nov, 2003.

SANTOS, E.C.O.; CAMARA, V.M.; JESUS, I.M.; BRABO, E.S.; LOUREIRO, E.C.B.; MASCARENHAS, A.F.S.; FAYAL, K.F.; SA, G.C.; SAGICA, F.E.S.; LIMA, M.O.; HIGUCHI, H.; SILVEIRA, I.M. A contribution to the establishment of reference values for total mercury levels in hair and fish in Amazonia. **Environmental Research**, San Diego. v.90, n.1, p.6-11, Sep, 2002.

SCHERY, S.D.; WHITTLESTONE, S.; HART, K.P.; HILL, S.E. The flux of Radon and Thoron from Australian soils. **Journal of Geophysical Research-Atmospheres**, Washington. v.94, n.D6, p.8567-8576, Jun, 1989.

SCHWEIZER, S.; THOMPSON, J.L.; TEEL, T.; BRUYERE, B. Strategies for communicating about climate change impacts on public lands. **Science Communication**, Thousand Oaks, CA. v.31, n.2, p.266-274, Dec, 2009.

SILVER, W.L.; NEFF, J.; MCGRODDY, M.; VELDKAMP, E.; KELLER, M.; COSME, R. Effects of soil texture on belowground carbon and nutrient storage in a lowland Amazonian forest ecosystem. **Ecosystems**, New York. v.3, n.2, p.193-209, Mar., 2000.

SOMASHEKARAPPA, H.M.; NARAYANA, Y.; RADHAKRISHNA, A.P.; SIDDAPPA, K.; JOSHI, V.B.; KHOLEKAR, R.V.; BHAGWAT, A.M. Atmospheric radon levels and its emanation rate in the environment of Kaiga. **Radiation Measurements**, Oxford. v.26, n.1, p.35-41, Jan, 1996.

SOTTA, E.D.; VELDKAMP, E.; SCHWENDENMANN, L.; GUIMARAES, B.R.; PAIXAO, R.K.; RUIVO, M.; DA COSTA, A.C.L.; MEIR, P. Effects of an induced drought on soil carbon dioxide (CO₂) efflux and soil CO₂ production in an Eastern Amazonian rainforest, Brazil. **Global Change Biology**, Oxford. v.13, n.10, p.2218-2229, Oct, 2007.

STAUFFER, B.; LOCHBRONNER, E.; OESCHGER, H.; SCHWANDER, J. Methane concentration in the glacial atmosphere was only half that of the preindustrial Holocene. **Nature**, London. v.332, n.6167, p.812-814, Apr., 1988.

STEELE, L.P.; DLUGOKENCKY, E.J.; LANG, P.M.; TANS, P.P.; MARTIN, R.C.; MASARIE, K.A. Slowing down of the global accumulation of atmospheric methane during the 1980s. **Nature**, London. v.358, n.6384, p.313-316, July, 1992.

STEVENS, C.M.; ENGELKEMEIR, A. Stable carbon isotopic composition of methane from some natural and anthropogenic sources. **Journal of Geophysical Research-Atmospheres**, Washington. v.93, n.D1, p.725-733, Jan., 1988.

STEVENS, C.M.; RUST, F.E. The carbon isotopic composition of atmospheric methane. **Journal of Geophysical Research (Oceans and Atmospheres)**, Washington. v.87, n.NC7, p.4879-4882, 1982.

STRIEGL, R.G. Diffusional limits to the consumption of atmospheric methane by soils. **Chemosphere**, Oxford, UK. v.26, n.1, p.715-720, Oct., 1993.

SUGIMOTO, A.; WADA, E. Hydrogen isotopic composition of bacterial methane: CO₂/H₂ reduction and acetate fermentation. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, Oxford. v.59, n.7, p.1329-1337, Apr., 1995.

TELLES, E.D.C.; DE CAMARGO, P.B.; MARTINELLI, L.A.; TRUMBORE, S.E.; DA COSTA, E.S.; SANTOS, J.; HIGUCHI, N.; OLIVEIRA, R.C. Influence of soil texture on carbon dynamics and storage potential in tropical forest soils of Amazonia (vol 17, pg 1040, 2003). **Global Biogeochemical Cycles**, Washington. v.18, n.1, Jan., 2004.

TORRES, R.B. Contribuição ao estudo do arcabouço estrutural da área do rio Tapajós, bacia do Amazonas, através da análise integrada de dados de topografia, geologia, magnetometria, gravimetria e sensoriamento remoto. São José dos Campos, 2000. 153 p. Dissertação de mestrado - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

TRUMBORE, S.E.; KELLER, M.; WOFSY, S.C.; DACOSTA, J.M. Measurements of soil and canopy exchange rates in the Amazon rainforest using Rn²²². **Journal of Geophysical Research-Atmospheres**, Washington. v.95, n.D10, p.16865-16873, Sep., 1990.

UCHIDA, M.; NOJIRI, Y.; SAIGUSA, N.; OIKAWA, T. Calculation of CO₂ flux from forest soil using ²²²Rn calibrated method. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam. v.87, n.4, p.301-311, Dec 1, 1997.

USSLER, W.; CHANTON, J.P.; KELLEY, C.A.; MARTENS, C.S. Radon-222 tracing of soil and forest canopy trace gas-exchange in an open canopy boreal forest. **Journal of Geophysical Research-Atmospheres**, Washington. v.99, n.D1, p.1953-1963, Jan., 1994.

VACQUIER, B.; ROGEL, A.; LEURAUD, K.; CAER, S.; ACKER, A.; LAURIER, D. Radon-associated lung cancer risk among French uranium miners: modifying factors of the exposure-risk relationship. **Radiation and Environmental Biophysics**, 48, n.1, p.1-9, Feb, 2009.

VARNER, R.; KELLER, M. **LBA-ECO TG-07 trace gas fluxes, undisturbed forest site, TNF Km 67, Brazil: 2000-2004**: lba.cptec.inpe.br, 2008. Disponível em: <http://lba.cptec.inpe.br>. Acesso em: 14 de Ago de 2009.

VELDKAMP, E.; WEITZ, A.M.; KELLER, M. Management effects on methane fluxes in humid tropical pasture soils. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, UK. v.33, n.11, p.1493-1499, Sep., 2001.

VERCHOT, L.V.; DAVIDSON, E.A.; CATTANIO, J.H.; ACKERMAN, I.L. Land-use change and biogeochemical controls of methane fluxes in soils of eastern Amazonia. **Ecosystems**, New York. v.3, n.1, p.41-56, Jan., 2000.

VIGANO, I.; VAN WEELDEN, H.; HOLZINGER, R.; KEPLER, F.; MCLEOD, A.; ROCKMANN, T. Effect of UV radiation and temperature on the emission of methane

from plant biomass and structural components. **Biogeosciences**, Kathlenburg-Lindau. v.5, n.3, p.937-947, 2008.

WAHLEN, M.; TANAKA, N.; HENRY, R.; DECK, B.; ZEGLEN, J.; VOGEL, J.S.; SOUTHON, J.; SHEMESH, A.; FAIRBANKS, R.; BROECKER, W. ^{14}C in methane sources and in atmospheric methane: The contribution from fossil carbon. **Science**, Washington. v.245, n.4915, p.286-290, July, 1989.

WASSMANN, R.; THEIN, U.G.; WHITICAR, M.J.; RENNENBERG, H.; SELTER, W.; JUNK, W.J. Methane emissions from the Amazon floodplain: Characterization of production and transport. **Global Biogeochemical Cycles**, Washington. v.6, n.1, p.3-13, Mar., 1992.

WHITICAR, M.J. Carbon and hydrogen isotope systematics of bacterial formation and oxidation of methane. **Chemical Geology**, Amsterdam. v.161, n.1-3, p.291-314, Sep., 1999.

WHITICAR, M.J.; FABER, E.; SCHOELL, M. Biogenic methane formation in marine and freshwater environments: CO_2 reduction vs. acetate fermentation - Isotope evidence. **Geochimica Et Cosmochimica Acta**, Oxford. v.50, n.5, p.693-709, May, 1986.

WHITTLESTONE, S.; ZAHOROWSKI, W.; SCHERY, S.D. Radon flux variability with season and location in Tasmania, Australia. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, Lausanne. v.236, n.1-2, p.213-217, Oct, 1998.

WILCOX, H.B.; AL-ZOUGHLOOL, M.; GARNER, M.J.; JIANG, H.; KLOTZ, J.B.; KREWSKI, D.; NICHOLSON, W.J.; SCHOENBERG, J.B.; VILLENEUVE, P.J.; ZIELINSKI, J.M. Case-control study of radon and lung cancer in New Jersey. **Radiation Protection Dosimetry**, Oxford. v.128, n.2, p.169-179, Jan, 2008.

WOFSY, S.C.; HARRISS, R.C.; KAPLAN, W.A. Carbon dioxide in the atmosphere over the Amazon basin. **Journal of Geophysical Research-Atmospheres**, Washington. v.93, n.D2, p.1377-1387, Feb., 1988.

WUEBBLES, D.J.; HAYHOE, K. Atmospheric methane and global change. **Earth-Science Reviews**, Amsterdam. v.57, n.3/4, p.177-210, May, 2002.

ZAUCKER, F.; DAUM, P.H.; WETTERAUER, U.; BERKOWITZ, C.; KROMER, B.; BROECKER, W.S. Atmospheric ^{222}Rn measurements during the 1993 NARE intensive. **Journal of Geophysical Research-Atmospheres**, Washington. v.101, n.D22, p.29149-29164, Dec., 1996.