INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia Associada à Universidade de São Paulo

As emissões de carbono provenientes da queima de biomassa e os fatores que a influenciam na Amazônia

LUCAS GATTI DOMINGUES

Tese apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Doutor em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Materiais

Orientador:
Prof. Dr. Afonso Rogrigues de Aquino

São Paulo
2019

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia Associada à Universidade de São Paulo

As emissões de carbono provenientes da queima de biomassa e os fatores que a influenciam na Amazônia

Versão Corrigida

Versão Original disponível no IPEN

LUCAS GATTI DOMINGUES

Tese apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Doutor em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Materiais

Orientador:
Prof. Dr. Afonso Rodrigues de Aquino

São Paulo
2019

Fonte de Financiamento: NOAA, NASA, FAPESP, NERC, ERC e Cnpq

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho,
para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte

Como citar:

DOMINGUES, L. G. ***As emissões de carbono provenientes da queima de biomassa e os fatores que a influenciam na Amazônia***. 2019. 163 p. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, São Paulo. Disponível em: (data de consulta no formato: dd/mm/aaaa)

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de geração automática da Biblioteca IPEN/USP,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Domingues, Lucas Gatti
As emissões de carbono provenientes da queima de biomassa e os fatores que a influenciam na Amazônia / Lucas Gatti Domingues; orientador Afonso Rodrigues de Aquino. -- São Paulo, 2019.
163 p.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear (Materiais) -- Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2019.

1. Amazônia. 2. Queimadas. 3. Emissão de Carbono. 4. Gases de efeito estufa. 5. Mudanças climáticas. I. Aquino, Afonso Rodrigues de, orient. II. Título.

*A meus pais **Sergio** e **Selena**, à minha esposa **Anne** e ao meu primogênito **Gael***

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares e ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais juntamente a todos seus funcionários e colaboradores, essenciais à execução deste trabalho.

Ao meu orientador Dr. Afonso Rodrigues de Aquino, pelo suporte e direcionamento profissional e pessoal.

À Dra. Luciana Vanni Gatti, pela oportunidade da longa caminhada com muitos aprendizados, oportunidades e minha formação profissional e pessoal.

Aos colegas, aos quais tenho grande apresso, Dr. John Miller , Dr. Emanuel Gloor e Dr. Wouter Peters pela paciência em transmitir conhecimentos.

Aos amigos de trabalho Raiane, Stephane, Viviane, Luciano, Luana, Graciela, Henrique e todos os demais que colaboraram no dia a dia, não somente com a ajuda profissional mas, também, no suporte emocional nesta caminhada. Fica a amizade e votos de encontros futuros.

Em especial aos amigos Alber Sanches, pelas incontáveis horas em desenvolvimento de scripts e aulas no programa R, Caio Correia e Ricardo Santana pela amizade que transcende ao trabalho.

A meus pais, sempre procurando me respaldar com o melhor que podem.

À minha amada esposa, eternamente grato, por estar sempre ao meu lado, de forma compreensiva, forte e resiliente.

Ao meu filho Gael, que adicionou desafios na execução deste mas modificou completamente minha forma de agir e enxergar o mundo.

Aos fomentadores do projeto, FAPESP, CNPq, NASA e NERC.

RESUMO

A grande quantidade de Carbono estocado nas árvores e solo da Floresta Amazônica está sob pressão pela mudança do uso da terra e de florestas, bem como, pelas alterações climáticas. Atrai muito a atenção de climatologistas ao redor do mundo justamente pelo potencial de rápida emissão deste Carbono estocado à atmosfera por meio da queima de biomassa. Vários esforços para monitorar as trocas de gases de efeito estufa entre a Floresta Amazônica e a atmosfera se encontram em andamento, incluindo amostragens regulares de perfil vertical (0-4,5 km) em quatro locais, formando um grande quadrante de foram a abranger toda a Bacia Amazônica. Os locais são representados por Santarém no estado do Pará (SAN - 2ºS, 54ºW), operante desde dezembro de 2000 até a atualidade; Tefé/Tabatinga (TEF/TAB - 3º, 65ºW), ao norte do estado do amazonas, operante desde Janeiro de 2010; Rio Branco (RBA - 9S, 67ºW), no estado do Acre, operante desde janeiro de 2010; Alta Floresta (ALF - 9ºS, 56ºW), divisa do norte de Mato Grosso com o sul do Pará, operante desde janeiro de 2010. Essas amostragens em perfil podem ser utilizadas para calcular fluxos de emissão da floresta tropical para a atmosfera em grande escala, incluindo as emissões provenientes da queima de biomassa. Para tal, considera-se o aumento ou esgotamento em relação à proporção de mistura de ar que entra na bacia Amazônica a partir do Atlântico, fornecendo um importante diagnóstico de estado, mudanças e sensibilidades das florestas. Uma possibilidade para estimar as concentrações de entrada no continente (*'background'*) é como uma média ponderada das concentrações medidas nas estações globais de Barbados e Ascencion no Atlântico, e estimar os pesos utilizando o SF_6 medido localmente como traçador das massa de ar. No entanto, este método é muito sensível a imprecisões das medições de SF_6 e assume que não há fontes deste na Bacia Amazônica, o que não mais é verdade. Por isso, apresenta-se aqui um método alternativo utilizando trajetórias retrocedentes das massas de ar denominado AMBaM. Também são apresentadas novas metodologias para o cálculo de variáveis climatológicas na Bacia e para a determinação das Áreas de Influências que representam os locais de amostragens. As descobertas aqui apresentadas, juntamente com o fluxo anual de monóxido de carbono e das emissões provenientes da queima de biomassa, sugerem que as principais causas destas são o aumento da temperatura média na Amazônia, o número de focos de queimada e a disponibilidade de água no solo, fazendo com que as emissões provenientes da queima de biomassa na Amazônia tenham contribuído no período de 2010 a 2016, com cerca de um terço das emissões de mudança do uso da terra e de florestas no globo, adicionando na atmosfera 0,38 $\pm$ 0,14 PgC. São também apresentados estudos das razões $CO:CO_2$, indicando um valore médio de 67 $\pm$ 24 ppb/ppm, valor este, próximo ao encontrado no passado em Savanas.

Palavras-chave: Amazônia. Queima de Biomassa. Emissão de Carbono.

CARBON EMISSIONS FROM BIOMASS BURNING AND ITS DRIVERS IN THE AMAZON

ABSTRACT

The large amount of carbon stored in trees and soils of the Amazon rainforest is under pressure from land use as well as climate change. It attracts the attention of scientisits around the world because of the potential for rapid emission of this carbon stored in the atmosphere through the burning of biomass. Several efforts to monitor greenhouse gases exchanges between the Amazon rainforest and the atmosphere are now ongoing, including regular vertical profile (0-4.5 km) sampling at four sites, forming a large quadrant to cover Amazon presented in this study, in which more than 500 vertical profiles were made between 2010 and 2016, totaling about 5000 samples of each gas studied. These profile measurements can be used to calculate large-scale tropical forest emission fluxes, including emissions from biomass burning. For this, it is consider the enhancement or depletion relative to mixing ratios of air entering the Amazon from the Atlantic, providing an important diagnostic of state, changes and sensitivities of the forests. One possibility to estimate greenhouse gas concentrations of incoming air ('background') is as a weighted mean of concentrations measured at two background sites, Barbados and Ascension, and to estimate the weights using SF_6 measured locally (in the Amazon) and at these two sites. However, this method is very sensitive to inaccuracies of SF_6 measurements and assumes that there are no SF_6 sources in the Amazon, which is not any longer true.Therefore, an alternative method is presented here using air mass back-trajectories called AMBaM. New methodologies are also presented for the calculation of meteorological variables in the region and for the determination of the areas of influence that represent the sampling sites. The findings presented here, together with the annual flow of carbon monoxide and emissions from biomass burning, suggest that the main causes of these are the increase in average temperature in the Amazon (about 1.1°C in 45 years), the number of fire spots and the availability of water in the soil, leading the emissions from biomass burning in the Amazon to contribute, from 2010 to 2016, with about a third of land use and forest change emissions in the globe, adding to the atmosphere 0.38 $\pm$ 0.14 PgC year $_{-1}$. Studies of the $CO:CO_2$ ratios are also presented for the four sampling sites, where different forest responses were observed in relation to the location and the measurement period, indicating an average value of 67 pm. 24 ppb / ppm that, even comparable to other studies, its use may induce discrepancies in the final information.

Keywords: Amazon. Biomass burning. Carbon emission.

LISTA DE FIGURAS

Pág.

1.1 Balanço radiativo sem a presença de gases de efeito estufa (figura a esquerda) e com a presença dos mesmo (figura a direita). 1

1.2 Variações de deutério (δD) no gelo antártico, que é um indicador para a temperatura local, e as concentrações atmosféricas dos GEE, tais como: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O) no ar preso dentro de núcleos de gelo e das medições atmosféricas. Os dados abrangem 650.000 anos e as bandas sombreadas indicam os períodos interglaciais quentes anteriores e atuais. 3

1.3 Recorte de artigo de jornal neozelandês reportando as implicações das emissões pela queima de carvão com o aumento da temperatura global. 4

1.4 Alterações observadas nas concentrações atmosféricas de gases de efeito estufa. Concentrações atmosféricas de CO_2 (verde), CH_4 (laranja) e N_2O (vermelho). Dados de testemunho de gelo (símbolos) e medições atmosféricas diretas (linhas) são sobrepostos. 5

3.1 Representação do balanço global de Carbono. 9

3.2 Série temporal do balanço global de Carbono e suas componentes. Emissões de CO_2 fóssil (cinza) e emissões LUC (marrom), e suas divisões entre a atmosfera (azul), o oceano (turquesa) e a terra (verde). A distribuição é baseado em estimativas quase independentes de observações e de conjuntos de modelos de processo limitados por dados e não soma exatamente o total das emissões, resultando em um desequilíbrio no balanço, que é representado pela diferença entre a linha rosa inferior, refletindo as emissões totais com a soma do oceano, terra e atmosfera. . 10

3.3 Série temporal estimada de LUC com a utilização de três diferentes estudos (HOUGHTON et al., 2012; GIGLIO et al., 2013; LEQUÉRÉ et al., 2016), diferenciadas em escala de cinza na figura. 12

3.4 Participação dos setores e subsetores nas emissões líquidas de CO_2 em 2010. 13

3.5 Série histórica dos índices de desmatamento anual na Amazônia Legal. . 14

3.6 Variação sazonal global de CO. 16

3.7 Variação sazonal global de CO_2. 18

3.8 CO_2 atmosférico em medidas no Observatório de Mauna Loa. 18

3.9 Anos com os maiores Enso index registrados desde 1950. 20

3.10 Taxa de crescimento global anual de CO_2. 20

4.1 Localizações dos pontos de amostragem georreferenciados, marcados em azul pelo ícone dos aviões e seus respectivos nomes e também ASC, RPB e CPT com o ícone rosa. Em vermelho vê-se a delimitação da Amazônia Legal. 21
4.2 Sistema de amostragem de ar versão 2 utilizados em Santarém e Rio Branco, onde: 1) PFP com 17 frascos de vidro; 2) PCP; 3) Painel do piloto; 4) Minicomputador; 5) GPS. 23
4.3 Sistema de amostragem de ar versão III, utilizado em Rio Branco, Tabatinga e Alta Floresta, onde: 6) PFP com 12 frascos de vidro; 7) PCP; 8) Painel do piloto; 9) Minicomputador; 10) GPS (2 modelos utilizados). . . . 24
4.4 Avião utilizado para a amostragem em Rio Branco e Tabatinga, modelo Seneca II, e em detalhe, indicado pelas setas vermelhas, o tubo coletor e a acomodação do sistema de coleta. 25
4.5 Avião, modelo Sertanejo, utilizado para a realização das amostragens em Santarém e, em detalhe, indicado pelas setas vermelhas, o tubo coletor e a acomodação do sistema de coleta. 26
4.6 Avião Cessna 210, utilizado na amostragem em Alta Floreta, e, em detalhe, indicado pelas setas vermelhas, a localização do tubo coletor e a acomodação do sistema de amostragem. 26
4.7 Esquema da trajetória realizada pela aeronave em trajetória helicoidal descente. 28
4.8 SAGEE no CCST/INPE. Onde: 1) Monitor LI-COR (CO_2); 2) Monitor de CO/H_2 Peak Laboratories (CO/H_2); 3) Cromatógrafo gasoso HP ($N_2O/SF_6/CH_4$); 4) Controlador de fluxo dos gases; 5) Válvula "*Sample select e System select*"; 6) sample/CO reference; 7) Medidor de vácuo e Receptor de amostras; 8) Interface do cromatógrafo; 9) Central única de processamento; 10) Tela operacional; 11) Interface do monitor de CO/H_2; (CPU); 12) Gases referência e curva de calibração; 13) Sistema de exaustão para cromatógrafo; 14) Banho resfriador. 29
4.9 Esquema de montagem de sistema SAGEE. 30
4.10 (a) Esquema de entrada e saída dos gases de referência e amostra nas células do monitor de CO_2 e (b) Esquema detalhado de uma célula. . . . 31
4.11 Análise de amostras de CO_2. A cada ponto de amostra (pontos em vermelho) é realizada a calibração com as referências em três diferentes concentrações conhecidas (pontos em azul) "*low*", "*medium*" e "*high*" . . . 32
4.12 Análise de amostras de CO. A cada pontos de amostra (pontos em vermelho) é realizado a calibração com uma referência. 33
4.13 Esquema de funcionamento do monitor de CO/H_2 Peak Laboratories (CO/H_2) 34

4.14 Representação do modelo simplificado utilizado para o cálculo de fluxo pelo Método de Integração de Coluna, o qual integra a massa de ar desde o solo (face inferior do cubo em vermelho) até a 4,5 km de altitude (face superior do cubo em azul). 35
4.15 Estudo da emissão de SF_6 no mundo. Os pontos em branco apontam os locais com emissão do gás. O circulo em vermelho destaca a inexistência de contribuição de SF_6 nos locais de influencia na amostragem. 37
4.16 Comparação para um perfil das combinações de parâmetros da componente vertical utilizados pelo modelo Hysplit. 40
4.17 Exemplificação da nova metodologia do cálculo do BKG com quatro trajetórias de massas de ar oriundas de Tefé, onde: linha azul pontilhada representa o limite virtual imposto; seta e "X"representam a projeção do cruzamento entre as estações globais; D1 e D2 representam a distancia das estações globais e o ponto “x” projetado. 41
4.18 Exemplo de perfil utilizado no cálculo da razão CO:CO_2 em ALF no dia 13 de agosto de 2010. À direita é mostrado o perfil completo, à esquerda o perfil após as análises de crescimento entre CO e CO_2 e, no meio, os pontos das concentrações de CO em função do CO_2 determinando a razão entre os mesmos, também observa-se as linhas limites (pontilhadas em azul) de 40 ppb CO e zero ppm CO_2 43
4.19 Exemplo de trajetórias calculada pelo modelo *Hysplit* com os pontos realizados a cada 1/4 de hora. 45
4.20 Trajetórias retrocedentes calculadas para todos os frascos coletados em RBA no ano de 2010. 46
4.21 Divisão do mapa da América do Sul em grades de 1º x 1º em simulação à área de influência em 2015 para RBA. 47
4.22 Resultado da distribuição das grades juntamente com as trajetórias retrocedentes das massas de ar em RBA no ano de 2010 destacando a escala de sensibilidade por número de pontos de trajetórias inseridos nas grades. 48
4.23 Estações da rede meteorológica INMET Convencionais (bolas em azul) e Automáticas (triângulos em amarelo) disponíveis para o ano de 2015. . 50
4.24 Distribuição das estações meteorológicas automáticas (pontos em azul) e convencionais (triângulos em amarelo) mantidas pelo INMET e também o esquema de distribuição das grades na Amazônia Legal. 51

5.1 Exemplo de trajetórias retrocedentes calculadas para cada amostra realizada nos anos de 2010 e 2011 no local de amostragem SAN. 54

5.2 Correlação obtida pela comparação dos resultados de CO_2 obtidos no topo de 22 perfis no local de amostragem SAH e os resultados preditos pelo AMBaM. 56
5.3 Correlação obtida pela comparação entre as metodologias para os gases CO, CH_4, N_2O e CO_2 e seus respectivos coeficientes. 57
5.4 Série temporal dos resultados de perfis de BKG AMBaM para os gases CO_2 e N_2O e as concentrações das estações globais RPB, ASC e CPT. . 58
5.5 Série temporal dos resultados de perfis de BKG AMBaM para os gases CO e CH_4 e as concentrações das estações globais RPB, ASC e CPT. . 59
5.6 Imagem com evento de densa cobertura de nuvens na região Norte do país no dia 24/03/2013. 61
5.7 Análise do número de estações disponíveis para os dados de Precipitação sem a aplicação do filtro e após a aplicação do mesmo. 63
5.8 Análise do número de estações disponíveis para os dados de temperatura sem a aplicação do filtro e após a aplicação do mesmo. 64
5.9 Estações convencionais disponíveis para a análise a partir de 1970 até 1993. 66
5.10 Estações convencionais (azul) e automáticas (amarelo) disponíveis para a análise a partir de 1994 até 2017. 67
5.11 Distribuição latitudinal (esquerda) e longitudinal (direita) em série temporal das estações INMET em escala de cores por precipitação. 68
5.12 Quantidade de estações INMET disponíveis por ano desde de 1970. . . . 69
5.13 Estações INMET incidentes em cada AI nos quatro locais de amostragem no ano de 2010. 71
5.14 Série temporal com precipitação média da Bacia Amazônica utilizando os dados INMET. Círculos em vermelho e área em azul destacando os anos 1991 e 1992. 72
5.15 Série temporal com os três meses com menores índices de precipitação e linha de tendência dos dados analisados. 73
5.16 Série temporal de precipitação nos anos de 2010 a 2016 mostradas em escala de cores. 74
5.17 Série temporal de temperatura máxima média mensal da Bacia Amazônica realizada com os dados INMET. 75
5.18 Comparação da temperatura média mensal no período de 2010 a 2016 (linha em rosa) com a temperatura média mensal no período histórico compreendido entre 1970 a 2000 (linha em preto). 76
5.19 Comparação da temperatura media anual no período de 1979 a 2017 utilizando as bases de dados INMET (azul) e ERA-Interim (vermelho com médias mensais e médias anuais em preto). 76

5.20 Número de focos de queimada na região da Amazônia Legal em vermelho e, em verde, o número de focos de queimada no Bioma Amazônia. . 77
5.21 Correlação do número de focos de queimada ocorridos em toda a Bacia Amazônica com o número de focos de queimada ocorridos no Bioma Amazônia. 77
5.22 Mapa da Amazônia Legal destacando a área do Arco do Desflorestamento em vermelho. 79
5.23 Distribuição gráfica dos resultados de $CO:CO_2$ para ALF. 80
5.24 Área de Influência das estações chuvosa (tons em azul) e seca (tons em vermelho) para ALF no ano de 2010. 81
5.25 Focos de queimada por tipo de bioma para a AI de ALF na estação seca. 82
5.26 Série temporal da precipitação na AI de ALF. 83
5.27 Série temporal da concentrações de CO para o local de amostragem ALF apresentado em escala de cores por altitude de coleta. 84
5.28 Trajetórias utilizadas para o cálculo da razão $CO:CO_2$, focos de queimada ocorridos no período de duração destas até o continentes (pontos em vermelho) distribuídos pelos biomas brasileiros em agosto de 2010. . 85
5.29 Trajetórias utilizadas para o cálculo da razão $CO:CO_2$, focos de queimada ocorridos no período de duração destas até o continentes (pontos em vermelho) distribuídos pelos biomas brasileiros em setembro de 2016. 86
5.30 Relação de focos de queimada e tipo de bioma distribuídos pela AI anual de ALF. 87
5.31 Perfis $CO:CO_2$ utilizados para o cálculo da razão em ALF. 89
5.32 Área de Influência média dos anos de 2010 a 2016 para RBA. 90
5.33 Mapa da região Amazônica, em verde área florestal intacta, em vermelho a área desmatada 2000-2010, em cinza escuro a área desmatada antes de 2000, e nas áreas não-florestadas cinza claro. 91
5.34 Série temporal das concentrações de CO no local de amostragem RBA apresentado em escala de cores por altitude de coleta. 92
5.35 Séries temporais de precipitação (esquerda) e número de focos de queimada (direita) calculados pela AI de RBA. 93
5.36 Trajetórias utilizadas para o cálculo da razão $CO:CO_2$, focos de queimada ocorridos no período de duração destas até o continente (pontos em vermelho) distribuídos pelos biomas brasileiros em agosto de 2010. . 95
5.37 Trajetórias utilizadas para o cálculo da razão $CO:CO_2$, focos de queimada ocorridos no período de duração destas até o continente (pontos em vermelho) distribuídos pelos biomas brasileiros em setembro de 2010. 96
5.38 Distribuição gráfica dos resultados de $CO:CO_2$ para RBA. 97
5.39 Área de Influência média dos anos de 2010 a 2015 para TAB e TEF. . . . 98

5.40 Série temporal das concentrações de CO nos locais de amostragem TAB e TEF apresentado em escala de cores por altitude de coleta. 99
5.41 Séries temporais de precipitação (esquerda) e número de focos de queimada (direita) calculados pela AI de TAB e TEF. 100
5.42 Trajetórias utilizadas para o cálculo da razão $CO:CO_2$, focos de queimada ocorridos no período de duração destas até o continentes (pontos em vermelho) distribuídos pelos biomas brasileiros em TAB na data 27/07/2010. Resultados deste: R^2 = 0,93 / $CO:CO_2$ = 124,5 ppb/ppm / SD = 16,7 101
5.43 Trajetórias utilizadas para o cálculo da razão $CO:CO_2$, focos de queimada ocorridos no período de duração destas até o continentes (pontos em vermelho) distribuídos pelos biomas brasileiros em TAB na data 26/09/2010. Resultados deste: R^2 = 0,86 / $CO:CO_2$ = 74,5 ppb/ppm / SD = 14,7 102
5.44 Trajetórias utilizadas para o cálculo da razão $CO:CO_2$, focos de queimada ocorridos no período de duração destas até o continentes (pontos em vermelho) distribuídos pelos biomas brasileiros em TEF na data 24/09/2014. Resultados deste: R^2 = 0,99 / $CO:CO_2$ = 72,2 ppb/ppm / SD = 4 103
5.45 Área de Influência média dos anos de 2010 a 2015 para SAN. 104
5.46 Série temporal das concentrações de CO no local de amostragem SAN apresentado em escala de cores por altitude de coleta. 105
5.47 Séries temporais de precipitação (esquerda) e número de focos de queimada (direita) calculados pela AI de SAN. 106
5.48 Relação de focos de queimada e tipo de bioma distribuídos pela AI anual de SAN. 107
5.49 Trajetórias utilizadas para o cálculo da razão $CO:CO_2$, focos de queimada ocorridos no período de duração destas até o continentes (pontos em vermelho) distribuídos pelos biomas brasileiros em SAN na data 29/11/2014. 109
5.50 Compilação dos resultados de $CO:CO_2$ comparando as razões por ano (barras em vermelho), por local de amostragem (barras em amarelo) e por mês (barras em verde). 111
5.51 Perfis realizados em RBA mostrando as altas concentrações de CO nos meses de agosto e setembro abaixo do limite de 1500 metros de altitude. 113
5.52 Resultados finais das razões $CO:CO_2$ nos quatro locais de amostragem e a média da Bacia Amazônica. 115
5.53 Áreas de influência calculadas para os quatro trimestres do ano de 2010 para os locais de amostragem ALF e RBA. 117

5.54 Áreas de influência calculadas para os quatro trimestres do ano de 2010 para os locais de amostragem SAN e TAB. 118
5.55 Limites da máscara EVA-florestada, Amazônia brasileira, Bacia Amazônica e Amazônia Legal. 120
5.56 Representação gráfica da série temporal das médias mensais de fluxo de CO, com as relativas médias anuais, número de focos de queimada, dados de anomalia GRACE, precipitação e temperatura relativas às AI trimestrais de cada ano para SAN. 122
5.57 Representação gráfica da série temporal das médias mensais de fluxo de CO, com as relativas médias anuais, número de focos de queimada, dados de anomalia GRACE, precipitação e temperatura relativas às AI trimestrais de cada ano para TAB/TEF. 123
5.58 Representação gráfica da série temporal das médias mensais de fluxo de CO, com as relativas médias anuais, número de focos de queimada, dados de anomalia GRACE, precipitação e temperatura relativas às AI trimestrais de cada ano para ALF. 124
5.59 Representação gráfica da série temporal das médias mensais de fluxo de CO, com as relativas médias anuais, número de focos de queimada, dados de anomalia GRACE, precipitação e temperatura relativas às AI trimestrais de cada ano para RBA. 125
5.60 Fluxos de CO (círculos em azul) e o fluxo natural de CO (quadrados e linha em marrom) calculados para os quatro locais de amostragem. . . . 130
5.61 Série temporal dos fluxos de Carbono provenientes da queima de biomassa por local de amostragem. 131
5.62 Série temporal dos resultados anuais das emissões de Carbono oriundos do cálculo do fluxo de CO, escalonados para a área EVA-florestada, utilizando os quatro locais de amostragem (barras em vermelho) e somente RBA e ALF (barras em azul). Também apresenta-se a média para todo período compreendido entre os anos 2010 a 2014 para os quatro locais de estudo (linha vermelha) e, de 2010 à 2016, para RBA e ALF (linha azul). 136
5.63 Série temporal dos resultados anuais das emissões de Carbono pela queima de biomassa, escalonados para a área EVA-florestada, utilizando os quatro locais de amostragem (barras em vermelho) e somente RBA e ALF (barras em azul). Também apresenta-se a média para todo período compreendido entre os anos 2010 a 2014 para os quatro locais de estudo (linha vermelha) e, de 2010 à 2016, para RBA e ALF (linha azul).136
5.64 Série temporal dos resultados anuais das emissões de CO pela queima de biomassa escalonados para a área EVA-florestada. 137
5.65 Série temporal obtida pela coluna total de CO com o satélite MOPITT. . . 138

5.66 Comparação entre as séries temporais de emissão proveniente da queima de biomassa escalonada à área EVA-florestada e os dados de desflorestamento na Amazônia Legal. 139
5.67 Comparação entre as séries temporais de emissão proveniente da queima de biomassa escalonada à área EVA-florestada e os dados de focos de queimada totais na Amazônia Legal. 140

LISTA DE TABELAS

Pág.

4.1 Plano de voo utilizado por local de amostragem em pés e metros com as versões do sistema 2 (V2) e 3 (V3). 27

5.1 Resultados do cálculo do fluxo utilizando o BKG AMBaM em comparação aos fluxos publicados em GATTI et al., 2014. 60

5.2 Perfis os quais foram utilizados para a determinação da razão $CO:CO_2$ em ALF. Na tabela vê-se a data dos perfis, o coeficiente de correlação, a razão $CO:CO_2$ e o desvio padrão relacionado à cada perfil. 79

5.3 Perfis os quais foram utilizados para a determinação da razão $CO:CO_2$ em RBA. Na tabela vê-se a data dos perfis, o coeficiente de correlação, a razão $CO:CO_2$ e o desvio padrão relacionado à cada perfil. 94

5.4 Perfis os quais foram utilizados para a determinação da razão $CO:CO_2$ em SAN. Na tabela vê-se a data dos perfis, o coeficiente de correlação, a razão $CO:CO_2$ e o desvio padrão relacionado à cada perfil. 107

5.5 Resultados das razões $CO:CO_2$ (ppb/ppm) em estudos realizados com medidas em avião na Bacia Amzônica. 110

5.6 Resultados das relações estatísticas para cada local de amostragem correlacionando o fluxo médio mensal de CO com focos de queimada, anomalia GRACE, precipitação e temperatura com seus respectivos coeficiente de correlação (R), R^2 ajustado (na tabela representado por R^2) e o *p-value*. 127

5.7 Resultados das relações estatísticas para cada local de amostragem correlacionando os dados de precipitação adiantados 2 meses com os dados de GRACE e fluxo de CO, com os respectivos coeficiente de correlação (R), R^2 ajustado (na tabela representado por R^2) e o *p-value*. . . . 128

5.8 Resultados das relações estatísticas para cada local de amostragem correlacionando o fluxo médio mensal de Carbono (F_{Fogo}) com focos de queimada, anomalia GRACE e temperatura com o fluxo de Carbono (F_{Fogo}) e os respectivos coeficiente de correlação (R), R^2 ajustado (na tabela representado por R^2) e o *p-value*. 132

5.9 Dimensões em hectares das áreas de influência para os locais e anos de amostragens. 134

5.10 Resultados das emissões anuais de Carbono calculados pelo fluxo de CO em TgC ano^{-1} e F_{Fogo} em PgC ano^{-1} escalonados para a área EVA-florestada nos anos de 2010 à 2014. 135

5.11 Resultados das emissões anuais de Carbono calculados pelo fluxo de CO em TgC ano^{-1} e F_{Fogo} em PgC ano^{-1} escalonados para a área EVA-florestada nos anos de 2010 à 2016, considerando somente os resultadois obtidos em ALF e RBA. 135

8.1 Datas dos perfis verticais realizados no local de amostragem ALF. 160
8.2 Datas dos perfis verticais realizados no local de amostragem RBA. 161
8.3 Datas dos perfis verticais realizados no local de amostragem SAN. 162
8.4 Datas dos perfis verticais realizados no local de amostragem TAB/TEF. . 163
8.5 Datas dos perfis verticais realizados no local de amostragem SAH. 164

SUMÁRIO

Pág.

1 INTRODUÇÃO 1

2 OBJETIVOS 8
2.1 Objetivo geral 8
2.2 Objetivos específicos 8

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 9

4 METODOLOGIA 21
4.1 Amostragem 21
4.1.1 Rotina de Amostragem 25
4.1.2 Quantificação dos gases 29
4.2 Método de Integração de Coluna para cálculo do fluxo 34
4.2.1 Extrapolação dos resultados de fluxo para a área de análise 36
4.3 Concentração de entrada no continente (BKG) 37
4.3.1 Método utilizando hexafluoreto de enxofre (SF_6) 37
4.3.2 Air Mass Back-trajectories Method (AMBaM) 38
4.4 Uso da Concentração de CO como Traçador de Queima de Biomassa . . 42
4.5 Cálculo das áreas de influência 45
4.6 Precipitação e Temperatura 49
4.6.1 Base de dados INMET 49
4.6.2 ERA-Interim 51
4.7 Análise estatística 52

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO 53
5.1 Desenvolvimento de metodologia - AMBaM 53
5.1.1 Validação do método 55
5.1.2 Comparação dos resultados do BKG AMBaM e os resultados obtidos pelo método baseado no SF_6 56
5.2 Desenvolvimento de metodologia para precipitação e temperatura 61
5.2.1 Aplicação da área de influência (AI) nas variáveis climáticas 70
5.3 Precipitação e temperatura na Bacia Amazônica 71
5.4 Queima de biomassa na Bacia Amazônica 77
5.5 Estudo das razões $CO:CO_2$ e a concentração de CO. 78
5.5.1 Alta Floresta - ALF 78

5.5.2 Rio Branco - RBA 89
5.5.3 Tabatinga e Tefé - TAB e TEF 98
5.5.4 Santarém - SAN 103
5.5.5 Resultados compilados de CO:CO_2 para a Amazônia 110
5.6 Fluxos de CO e carbono proveniente da queima de biomassa 116
5.6.1 Fluxo de CO 121
5.6.2 Fluxo de Carbono proveniente da queima de biomassa (F_{Fogo}) 129
5.7 Números finais de emissão extrapolados para Bacia Amazônica 134

6 CONCLUSÕES 142

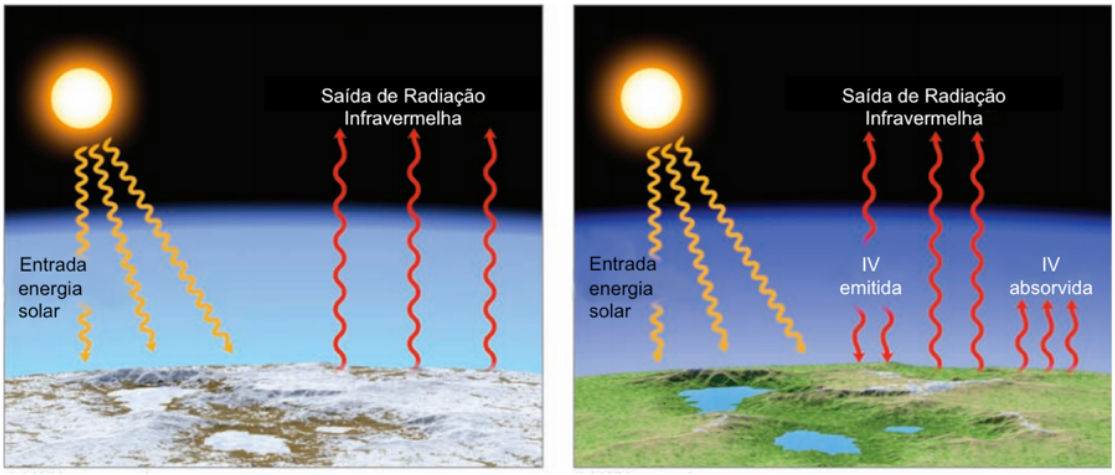
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 145

8 ANEXO A - DATAS DOS PERFIS 160

1 INTRODUÇÃO

A constituição do clima terrestre, se deve à conjuntura de um complexo sistema com interações interligadas com a atmosfera, os sistemas aquáticos, os seres vivos e a superfície terrestre. Durante milhões de anos ocorreram na Terra ciclos naturais de aquecimento e resfriamento, com processos com grande potencial de emissão de gases com a capacidade de absorver energia na faixa de infravermelho, como a erupção de vulcões, criando um efeito estufa natural (IPCC, 2014), contribuindo para que a Terra apresentasse um temperatura média de 15ºC. Sem a presença deste fenômeno, é estimado uma temperatura média para a Terra igual a 18ºC negativos, como vê-se na Figura 1.1 (AHRENS, 2012).

Figura 1.1 - Balanço radiativo sem a presença de gases de efeito estufa (figura a esquerda) e com a presença dos mesmo (figura a direita).



Fonte: Adaptado de (AHRENS, 2012).

Este efeito é produzido devido a existência de gases na atmosfera, como o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4), o óxido nitroso (N_2O), o vapor d'água (H_2O), o ozônio (O_3) entre outros, os quais possuem a capacidade de reter a radiação na faixa de infravermelho, absorvendo energia na forma de calor e refletindo-as à superfície terrestre, aquecendo assim, a temperatura na troposfera e contribuindo para o aumento da temperatura global média (SCHNEIDER, 1989; BECK et al., 2012). Este é um fenômeno muito bem conhecido, com uma das primeiras publicações realizada pelo químico sueco e Prêmio Nobel Svante Arrhenius (ARRHENIUS, 1896), realizada há mais de 120 anos.

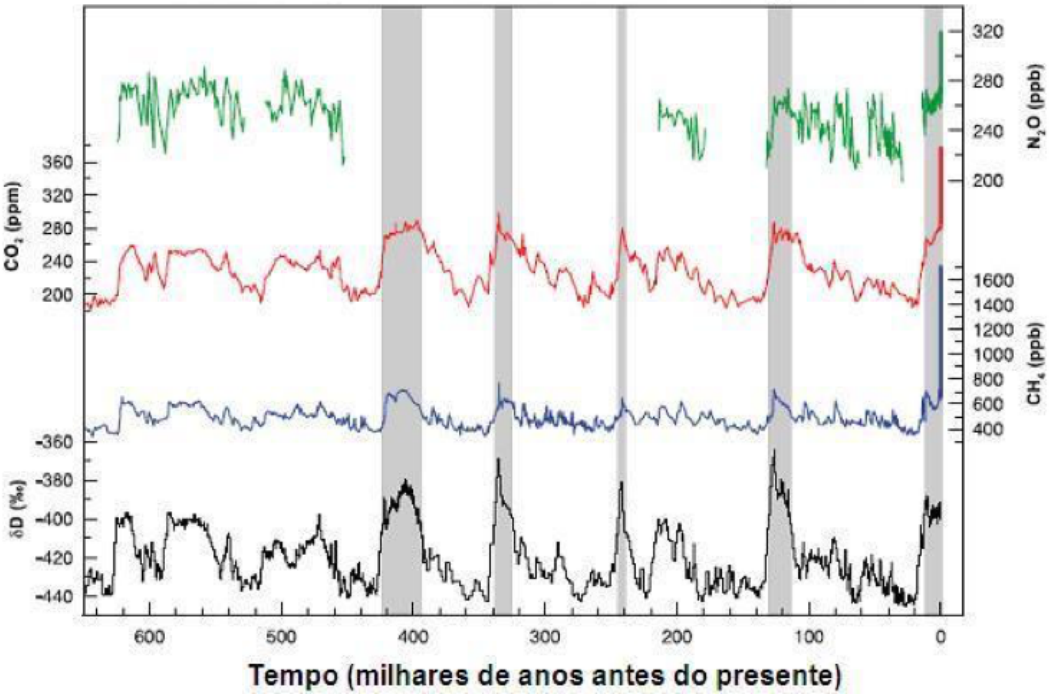
O aumento das concentrações de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, induzidas por atividades naturais e antrópicas, geram influências diretas ao balanço ou fluxo de energia terrestre, que é notoriamente relacionado à circu-

lação oceânica e ao ciclo hidrológico do planeta (STEPHENS et al., 2012). Os GEE possuem uma forçante radiativa (FR), que é uma medida da alteração líquida no balanço de energia dada em W m^{-2}, positiva, o que gera alterações neste balanço, justamente pela sua característica de absorção e radiação de ondas infravermelhas emitidas pela superfície terrestre.

Desde o início da existência humana na Terra é promovida a alteração no equilíbrio ecológico, intensificada, principalmente, a partir da Revolução Industrial. Com o crescimento populacional ocorrendo de forma exponencial, gera-se, como consequência, um maior consumo de recursos, aumentando de forma proporcional à esta demanda, a produção em atividades industriais, agro-pecuárias, uso de energia e combustíveis fósseis, que, por serem atividades com relações intrínsecas à emissões de GEE, geram enriquecimento à atmosfera (CIAIS et al., 2013; LEQUÉRÉ et al., 2015). Apesar de há muito se modificar o ecossistema, somente nos últimos dois séculos, o fluxo de emissões com origem antrópica passou a possuir a mesma magnitude do fluxo de emissões por fontes naturais relacionadas ao ciclo do Carbono (MALHI et al., 2002), mostrando a capacidade de perturbação ocasionada pelo homem.

Dados de testemunhos de gelo, forneceram registros das concentrações dos gases da atmosfera durante os últimos 650.000 anos. A neve que a cada ano precipita sobre as geleiras, guarda informações das concentrações atmosféricas de poeira, sal marinho, cinzas e de gases, em bolhas de ar aprisionadas sob o gelo. Com a utilização destas por meio da amostragem em testemunhos de gelo, tornou-se possível investigar as condições climáticas e atmosféricas do passado, como vê-se na Figura 1.2, na qual apresenta-se o resultado de estudos de CO_2, CH_4, N_2O e, também, do deutério (δD). A proporção de isótopos estáveis presente na água, como o δD, possui uma relação direta com a temperatura, desta forma, foi utilizado para inferir as temperaturas do passado. As evidências encontradas neste estudo, serviram de base para que cientistas concluíssem que o aumento das concentrações de GEE na atmosfera é o principal fator responsável pelo atual aquecimento do planeta (IPCC, 2007).

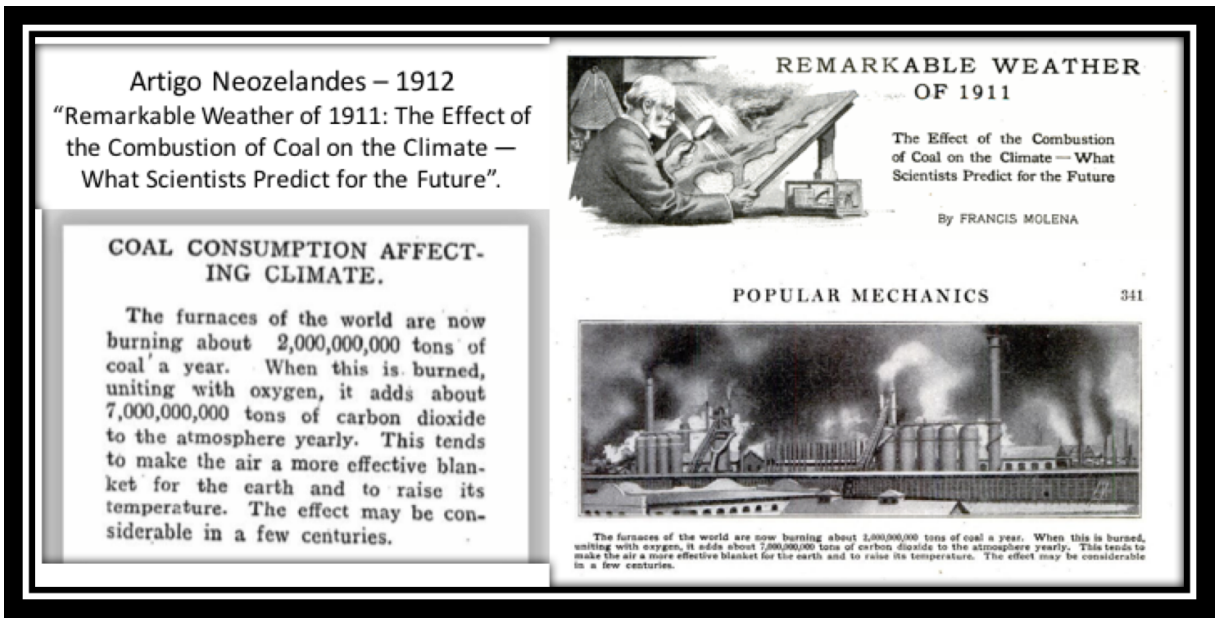
Figura 1.2 - Variações de deutério (δD) no gelo antártico, que é um indicador para a temperatura local, e as concentrações atmosféricas dos GEE, tais como: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O) no ar preso dentro de núcleos de gelo e das medições atmosféricas. Os dados abrangem 650.000 anos e as bandas sombreadas indicam os períodos interglaciais quentes anteriores e atuais.



Fonte: Adaptado de (IPCC, 2007).

A influência das emissões de GEE na temperatura global, também é algo já comentado há tempos. Em 1912, um jornal não científico e de ampla circulação neozelandês, já descrevia alertas científicos sobre os efeitos das emissões pela queima de carvão na atmosfera e a tendência de ocorrer aumentos na temperatura terrestre em decorrência dos mesmos. Na Figura 1.3 pode-se observar a publicação intitulada de "*Remarkable Weather of 1911: The Effect of the Combustion of Coal on the Climate - What Scientists Predict for the Future*".

Figura 1.3 - Recorte de artigo de jornal neozelandês reportando as implicações das emissões pela queima de carvão com o aumento da temperatura global.

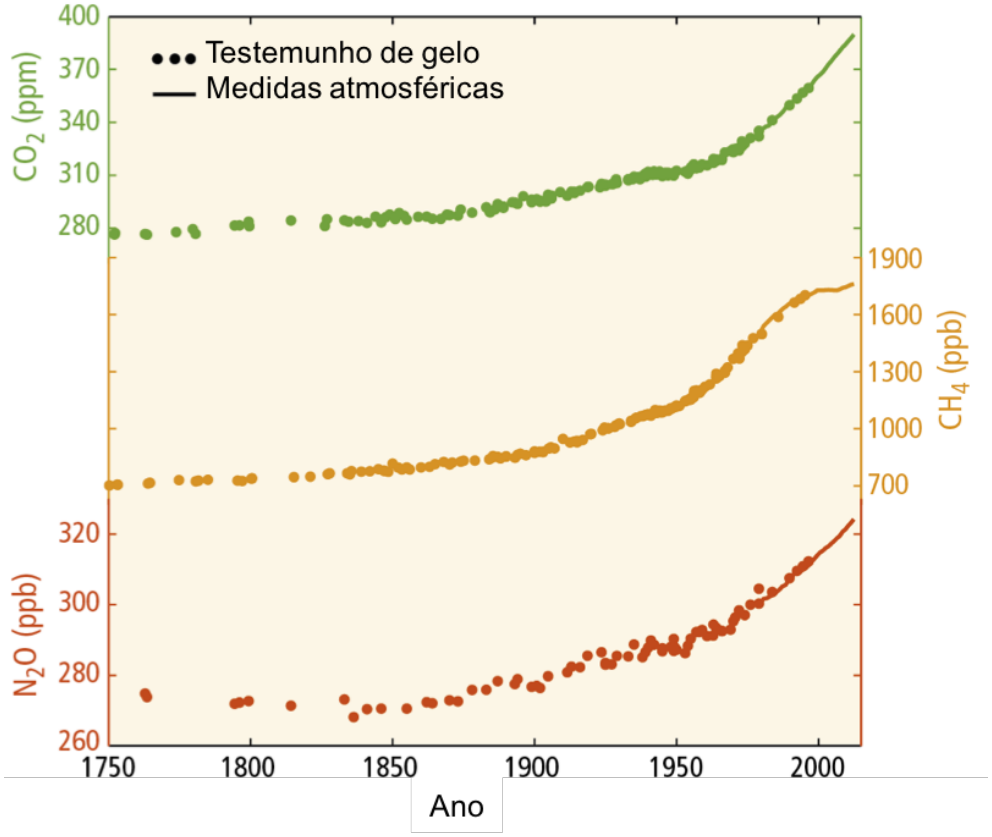


Fonte: The Rodney and Otamatea Times.

Instituições renomadas como a WMO/GAW (*World Meteorological Organization / Global Atmosphere Watch*) e o IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) e em diversas publicações científicas, são categóricas ao afirmar que a emissão de GEE de origem antropogênica são a causa das modificações no clima a qual testemunhamos. Em pesquisa realizada pelo jornal *The Guardian*, 97% das publicações científicas revisadas estão em acordo com esta assertiva, sendo apenas 3% das publicações justificando o aquecimento global por outras alternativas que não a antrópica (THE GUARDIAN, 2019). Portanto existe este consenso na comunidade científica e negar a existência deste fenômeno não é a melhor solução para combatê-lo, postura esta, de grandes lideranças mundiais.

Enquanto nega-se a existência do grande potencial de aquecimento da Terra, o crescimento das emissões dos principais GEE são constatados à cada publicação. Na Figura 1.4 pode-se ver a aceleração do crescimento das emissões, principalmente de CO_2 e de N_2O, após o ano 2000.

Figura 1.4 - Alterações observadas nas concentrações atmosféricas de gases de efeito estufa. Concentrações atmosféricas de CO_2 (verde), CH_4 (laranja) e N_2O (vermelho). Dados de testemunho de gelo (símbolos) e medições atmosféricas diretas (linhas) são sobrepostos.



Fonte: Adaptado de (IPCC, 2014).

Nesta conjuntura de crescimento de emissões de GEE, em modelos de predição climática, foram estimados cenários para o aquecimento global até o ano de 2090. Nas predições mais otimistas, calcula-se um aquecimento médio de 1,5°C e, no cenário mais pessimista, um aquecimento médio de 4,5°C. O que se sabe é que dificilmente a Terra aquecerá menos de 1°C e mais de 6°C (IPCC, 2014), principalmente pelas emissões provenientes da queima de combustíveis fósseis e mudanças do uso da terra e de florestas (LEQUÉRÉ et al., 2015).

Em particular relação com as emissões provenientes da mudanças do uso da terra e de florestas, as florestas tropicais desempenham um papel muito importante pela quantidade de carbono estocado e o potencial de rápida emissão por meio da queima de biomassa (ANDREAE et al., 2012). Cerca de 50% das florestas tropicais do globo estão localizadas na América do Sul. A Floresta Amazônica, com área equivalente à aproximadamente 8 x 10^6 km^2, representa praticamente a metade do território do continente Sul Americano (GATTI et al., 2014), dos quais cerca

de 60% desta área estão em território nacional identificada como “Amazônia Legal”, que abrange uma área de 5,08 x 10^6 km^2 (GLOOR et al., 2012).

A floresta tem sofrido com a ação humana devido à exploração de madeira, conversão da floresta e outras formas de exploração de seus recursos, sendo o desmatamento a atividade humana que afeta diretamente as maiores áreas de floresta da Amazônia brasileira (FEARNSIDE, 2005; GLOOR et al., 2012).

Embora a Amazônia brasileira, de acordo com dados oficiais do Projeto de Estimativa do Desflorestamento da Amazônia (PRODES), ainda possua cerca de 80% de florestas intactas (REGALADO, 2010; PRODES, 2011) e a taxa divulgada de desmatamento demonstre regressão ou estabilização ao passar dos anos, estudos da emissão de carbono e emissões provenientes da queima de biomassa produzem dados relevantes para a avaliação da situação atual da floresta e insere argumentos técnicos para a aproximação aos tomadores de decisão, sustentando a importância da conservação do bioma, podendo evitar que medidas como a abertura da exploração de grandes reservas na Bacia para exploração de minérios, por exemplo, sejam tomadas e que gere conhecimento sobre a importância da Bacia Amazônica no cenário climático mundial.

No recente artigo lançado por ARAGÃO et al., 2018 , os autores destacam a importância da incorporação às estimativas nacionais de emissões de gases, as perdas de carbono à atmosfera associadas às queimadas e, não somente, as associadas ao desmatamento, para o desenvolvimento de soluções pragmáticas e efetivas para manter as baixas taxas de desmatamento, encontrar novas práticas de manejo da terra e restringir a incidência de fogo.

Neste sentido, este trabalho buscou a atualização e o desenvolvimento de novas ferramentas afim de aprimorar a quantificação do fluxo de carbono proveniente da queima de biomassa na Bacia Amazônica e introduz dados inéditos na cadeia de conhecimento no que concerne ao estudo das emissões na Bacia Amazônica. Foi realizado o desenvolvimento de uma nova metodologia para o cálculo das concentrações de entrada no continente, quesito imprescindível ao cálculo do “modelo de caixa” apresentado por CHOU W.W.; SACHSE, 2002.

Também foi desenvolvida nova metodologia para o cálculo de variáveis climatológicas, utilizando estações de medidas locais e não por sensoriamento remoto que, por meio do desenvolvimento do cálculo de áreas de influências relacionadas à abrangência espacial dos locais de medidas, as estações de medidas foram selecionadas em acordo com estas.

Para a determinação da emissão de carbono proveniente da queima de biomassa, é necessário a segregação do carbono proveniente de outras fontes que não o fogo. Para tal se faz necessária a aplicação de fatores de emissão, neste caso, o fator aplicado é a razão entre as concentrações de monóxido de carbono pelas concentrações de dióxido de carbono. Neste trabalho, também de forma inédita, são tratados estudos de fatores de emissão em diferentes locais dentro da Bacia Amazônica com medidas de longo termo, além do próprio fluxo de emissões do monóxido de carbono a partir do modelo de caixa denominado de Método de Integração de Coluna, adaptado por MILLER et al., 2007.

Este trabalho está inserido em projetos em parceria com a NASA, NOAA, Universidade de Leeds e Universidade de Wageningen e no recém aprovado projeto FAPESP denominado de CARBAM. Os resultados obtidos até o momento estão inseridos em dois artigos, o primeiro publicado em 2016 na revista "*Athmospheric Measurements Techiniques*" intitulado de "*Validation and analysis of MOPITT CO observations of the Amazon Basin*" (DEETER et al., 2016) e, o segundo publicado em 2018 na revista *Nature Communications* intitulado de "*21st Century drought-related fires counteract the decline of Amazon deforestation carbon emissions*" (ARAGÃO et al., 2018).

As análises de temperatura e precipitação fazem parte da publicação "*Tropical land carbon cycle responses to 2015/16 El Niño as recorded by atmospheric greenhouse gas and remote sensing data*" na *Royal Society Philosophical Transactions B.*

A nova metodologia desenvolvida para o cálculo das concentrações de entrada no continente foi objeto da construção de artigo científico intitulado como "*A new background method for greenhouse gases flux calculation based in back-trajectories over the Amazon Basin*" submetido para revisão à revista "*Athmospheric Measurements Techiniques*".

Além dos trabalhos já submetidos ou publicados, os dados doravante apresentados fazem parte de mais quatro publicações em desenvolvimento. Durante o doutorado, o autor também participou do desenvolvimento de equipamento auxiliar para a secagem do ar amostrado em perfis de avião, dando origem ao trabalho intitulado "*Evaluation of a field-deployable Nafion-based air drying system for collecting whole air samples and its application to stable isotope measurements of* CO_2" submetido à revista "*Athmospheric Measurements Techiniques*".

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste projeto é o de utilizar as amostragens ”*in-situ*” na Amazônia para a determinação das emissões provenientes da queima de biomassa no período compreendido entre os anos de 2010 a 2016.

2.2 Objetivos específicos

1. Caracterizar os perfis verticais e analisar a concentração de CO_2, CO e SF_6 em quatro localidades na região Amazônica, formando um grande quadrante nesta.

2. Determinar as concentrações de entrada no continente de CO_2 e CO, utilizando o SF_6 como traçador de massa de ar.

3. Desenvolver novas metodologias no cálculo das concentrações de entrada no continente.

4. Simular as trajetórias das massas de ar para cada perfil vertical amostrado e a cada 500m de altura utilizando o modelo de trajetórias HYSPLIT®.

5. Realizar estudo da emissão de Carbono proveniente da queima de biomassa:

5.1. Calcular os fluxos de emissão de CO e a razão CO:CO_2 para os perfis com características de plumas de queimada, para posterior determinação da razão de emissão por queima de biomassa.

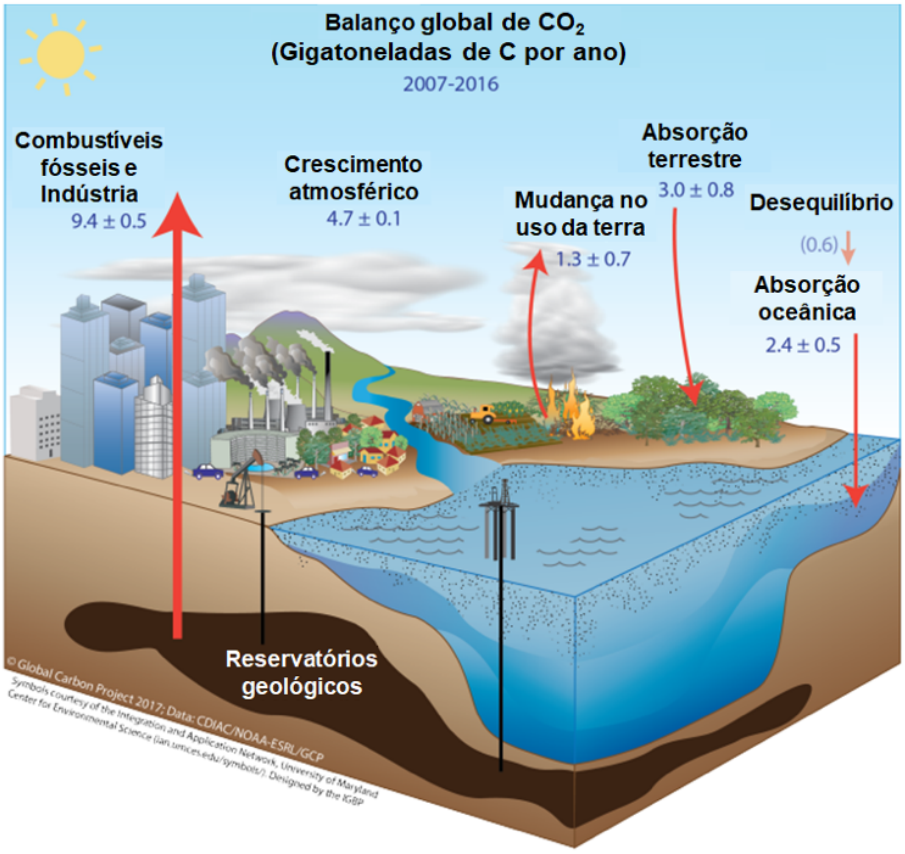
5.2. Relacionar a emissão por queima de biomassa com o número de focos de queimada.

6. Estudar a influência de parâmetros climáticos no balanço de carbono.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O balanço global de carbono descreve a média, as variações e as tendências na perturbação atmosférica de CO_2 parametrizada ao início da Era da Revolução Industrial. São quantificadas as adições em emissões para a atmosfera provenientes de atividades humanas, a taxa de crescimento das concentrações de CO_2 e as resultantes das modificações nos estoques de Carbono nos reservatórios terrestres (geológicos) e oceânicos, relacionado-os às variações das concentrações atmosféricas de CO_2, mudanças no clima e outras modificações antrópicas e naturais (LEQUÉRÉ et al., 2016). As componentes deste balanço são relatadas anualmente e incluem estimativas separadas para emissões provenientes da queima de combustíveis fósseis, processos energéticos, industriais e a produção de cimento resultantes de atividades humanas, incluindo emissões provenientes da mudança do uso da terra e de florestas (LUC) e a taxa de crescimento da concentração atmosférica de CO_2. Também considera-se a absorção de CO_2 pelos oceanos (LEQUÉRÉ et al., 2018). Na Figura 3.1 pode-se ver o esquema de distribuição do balanço global de Carbono.

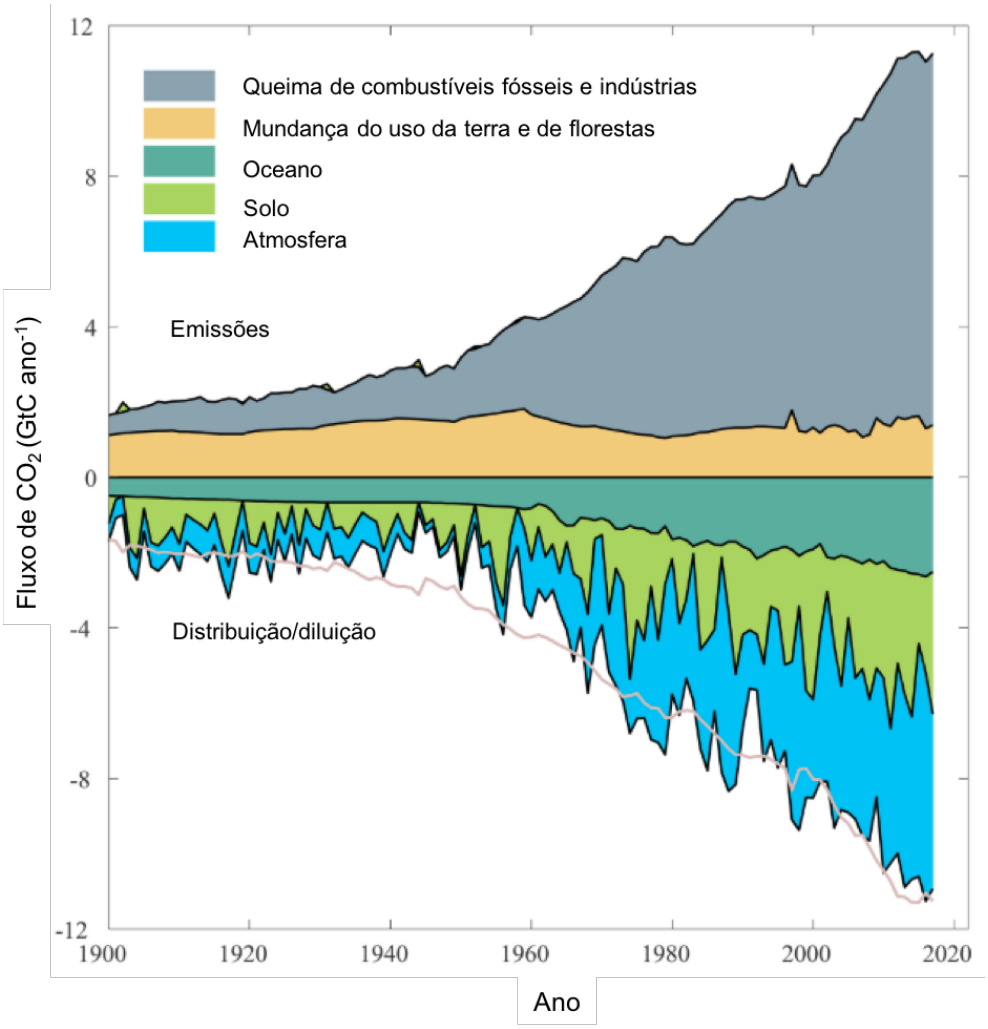
Figura 3.1 - Representação do balanço global de Carbono.



Fonte: Adaptado de (LEQUÉRÉ et al., 2016).

A média global do balanço de Carbono nos últimos 50 anos sofreu grandes influências, principalmente, das emissões pela queima de combustíveis fósseis e pela mudança do uso da terra e de florestas (LUC). Para este período, 82% das emissões totais foram causadas por emissões de CO_2 fóssil e 18% pela LUC. Estas emissões foram distribuídas/diluídas entre a atmosfera (45%), o oceano (24%) e o solo ou superfície terrestre (30%) (LEQUÉRÉ et al., 2018). Na Figura 3.2, pode-se observar as componentes combinadas do balanço global de Carbono como uma função do tempo.

Figura 3.2 - Série temporal do balanço global de Carbono e suas componentes. Emissões de CO_2 fóssil (cinza) e emissões LUC (marrom), e suas divisões entre a atmosfera (azul), o oceano (turquesa) e a terra (verde). A distribuição é baseado em estimativas quase independentes de observações e de conjuntos de modelos de processo limitados por dados e não soma exatamente o total das emissões, resultando em um desequilíbrio no balanço, que é representado pela diferença entre a linha rosa inferior, refletindo as emissões totais com a soma do oceano, terra e atmosfera.



Fonte: Adaptado de (LEQUÉRÉ et al., 2016).

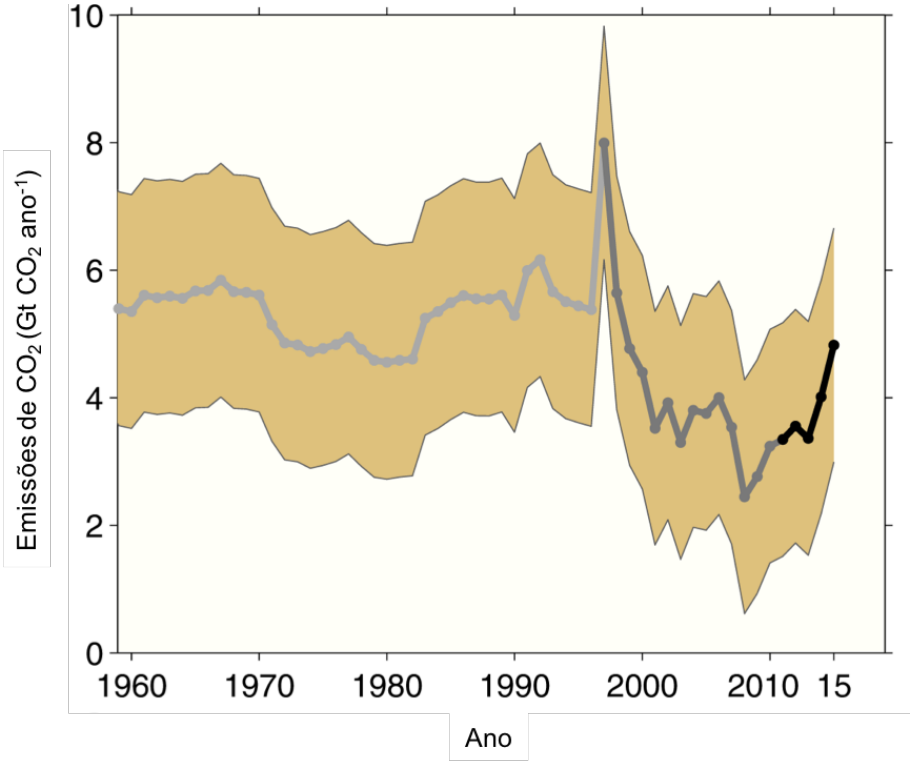
A contribuição da LUC para as emissões de carbono antropogênico foi de cerca de 33% do total de emissões nos últimos 150 anos, 20% das emissões totais nas décadas de 1980 e 1990 e 12,5% do total emissões entre 2000 e 2009. Esta fração declinante não é em razão da diminuição das emissão por meio da LUC mas sim, em grande parte, o resultado do aumento das emissões de provenientes da queima de combustíveis fósseis (HOUGHTON et al., 2012).

Em uma análise geral todos os componentes, exceto as emissões LUC, cresceram desde 1959, com importante variabilidade interanual na taxa de crescimento da concentração atmosférica de CO_2. Em 2016 as emissões de CO_2, provenientes do uso de combustíveis fósseis e indústrias foi de 9,4 $\pm$ 0,5 GtC ano^{-1}. Apesar de as emissões pela LUC permanecerem relativamente constantes com valores de 1,3 $\pm$ 0,7 GtC ano^{-1}, estas são medidas com grandes variações durante os anos e, na última década, viu-se um sensível aumento das emissões com uma média de 1,9 $\pm$ 0,6 GtC ano^{-1}. Todavia, as incertezas inerentes as estas medidas continuam altas (LEQUÉRÉ et al., 2018), principalmente pela dificuldade em obtenção de dados com atenção à mudanças em superfícies de florestas (LEQUÉRÉ et al., 2016).

Neste sentido, o desmatamento, as queimadas, os incêndios acidentais liberam grande quantidade de Carbono à atmosfera. A maior parte da queima de biomassa ocorre nos trópicos, sendo altamente sazonal, tendo seu ápice na estação seca, entre janeiro a abril no Trópico Norte, e de agosto a novembro no Trópico Sul (D'AMELIO et al., 2009; GATTI et al., 2010; BORGES, 2019)

Em nova apresentação de resultados sobre LUC publicada por meio do *Global Carbon Budget 2016*, vê-se o potencial de influência causado pela queima de biomassa em florestas em âmbito global. Na Figura 3.3 observa-se a série temporal de emissões provenientes da LUC a qual apresenta dois picos. Estes são correlacionados com grandes eventos de queima de biomassa em florestas. Nesta também vê-se a dificuldade em correlacionar dados globais já que para uma série temporal foi necessária a junção de três estudos para sua formação (HOUGHTON et al., 2012; GIGLIO et al., 2013; LEQUÉRÉ et al., 2016).

Figura 3.3 - Série temporal estimada de LUC com a utilização de três diferentes estudos (HOUGHTON et al., 2012; GIGLIO et al., 2013; LEQUÉRÉ et al., 2016), diferenciadas em escala de cinza na figura.



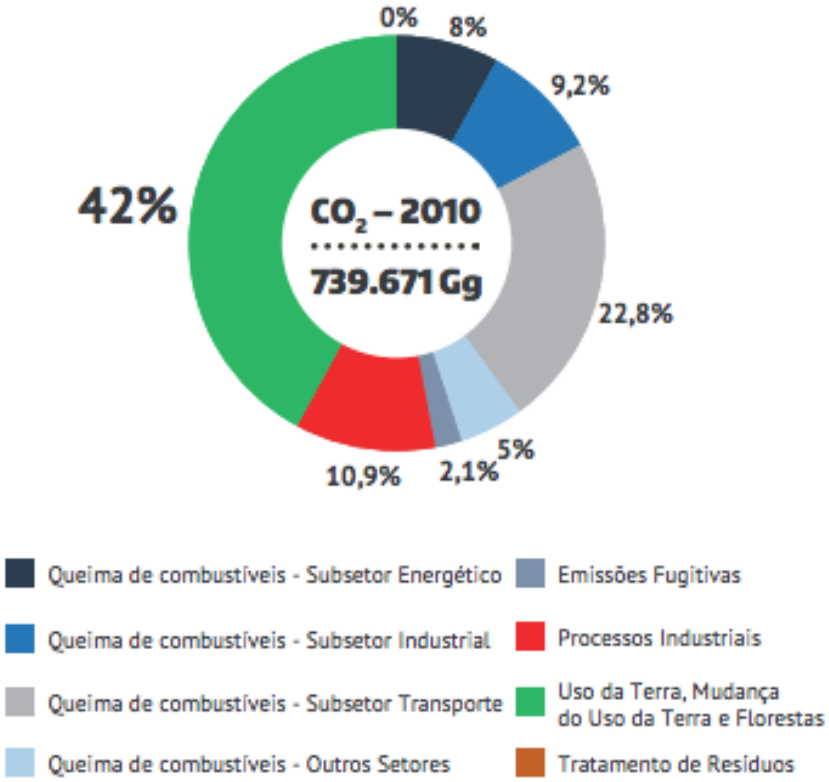
Fonte: Adaptado de (LEQUÉRÉ et al., 2016).

Em um cenário nacional, as emissões provenientes da LUC são imperativas. De acordo com dados oficiais do governo pelas Comunicações Nacionais, em 1990, 77% das emissões de CO_2 tinham como origem às LUC (MCT, 2004). 20 anos depois, em 2010 a fração destas emissões foi reduzida, no entanto, ainda permanecendo majoritária representando 42% do total de emissões (MCTI, 2016), conforme vê-se na Figura 3.4.

Este que é um tema muito sensível ao país, discutido de forma ampla por lideranças políticas e debatido por jornais em episódios recentes, já que o país recebe pagamentos por programas como o REDD+, que é um incentivo financeiro para a Redução das Emissões por Desmatamento e Degradação florestal, cuja definição provem seu acrônimo ou, em inglês, *Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation*. Além disso, o país faz parte do Acordo de París no qual o país se compromete a reduzir as emissões referentes à LUC em 43% com base nos pico histórico recente de desmatamento em 2005. Estas reduções foram tratadas em Decreto número 7.390 de 2010 que estabelece uma redução de 80% do desmatamento do bioma Amazônia em relação à média verificada entre 1996 e 2005 e

de 40% do desmatamento do bioma Cerrado em relação à média entre os anos de 1999 a 2008.

Figura 3.4 - Participação dos setores e subsetores nas emissões líquidas de CO_2 em 2010.



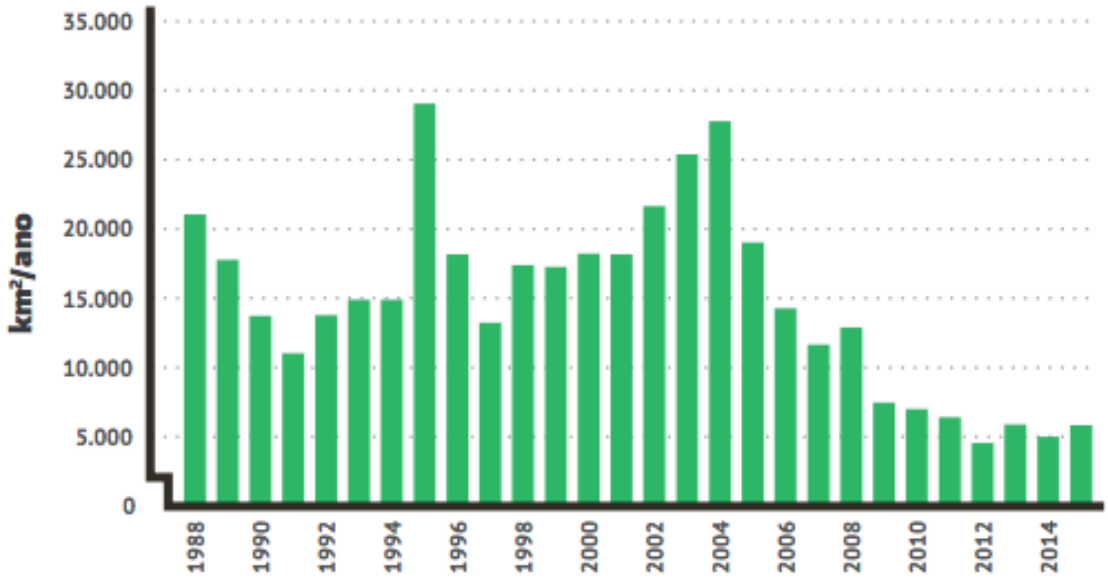
Fonte: (MCTI, 2016)

O tema de emissões provenientes da LUC no Brasil é latente no mundo devido a Floresta Amazônica, que é reconhecida como a maior floresta tropical existente, e por possuir grande variedade de ecossistemas, dentre os quais se destacam as matas de terra firme, as florestas inundadas, as várzeas, os igapós, os campos abertos e os cerrados, abrigando um grande número de espécies vegetais e animais. Ocupa os Estados do Acre, Amapá, Amazonas, Pará, Rondônia, Roraima e parte dos Estados do Maranhão, Tocantins e Mato Grosso (MCT, 2010).

Justamente por possuir grandes áreas florestadas, que quando sofrem com o desmatamento, geram um efeito de duas vias à Amazônia e a emissão de gases atmosféricos pois ocorre a diminuição da capacidade de mitigação da mesma, por meio do sequestro de carbono, das emissões oriundas da queima de biomassa e de combustíveis fósseis (GLOOR et al., 2012). Além disso, deve-se salientar o importante papel desempenhado pela floresta no controle do regime de precipitação e umidade em parte da América do Sul (MCT, 2010).

De acordo com a publicação oficial por meio da ”Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima” de 2004 a 2013, diversas políticas de redução e combate ao desmatamento foram criadas, dentre elas a criação de Unidades de Conservação Federais (UCs) em âmbitos federais, estaduais e municipais, somando cerca 50 milhões de hectares protegidos, além da homologação de 10 milhões de hectares de terras indígenas, a execução de operações de fiscalização e combate ao desmatamento, realocação de mais de 10 mil famílias em áreas remanescentes da Reforma Agrária, entre outras. Segundo a mesma publicação, estas ações resultaram na preservação de 62 mil Km^2 de área de floresta, o que representaria até 52% do total previsto de desmatamento no período e, desta forma, contribuindo para uma redução do desmatamento em território nacional de cerca de 79%, como vê-se na Figura 3.5. No entanto, recentes movimentações por parte do governo, indicam a possibilidade de um relaxamento nas medidas protetoras da exploração na Bacia, trazendo ainda mais relevância à projetos de monitoramento na Amazônia paralelos aos oficiais, assim agregando informações para a correta tomada de decisão.

Figura 3.5 - Série histórica dos índices de desmatamento anual na Amazônia Legal.



Fonte: (MCTI, 2016)

Estima-se que a Amazônia possui armazenada uma taxa de biomassa viva na ordem de 95 a 120 PgC e mais 160 PgC no solo) (GIBBS et al., 2007; MALHI, 2010; SAATCHI et al., 2011), possui uma das maiores reservas de carbono acima e abaixo da terra e abriga cerca de um quarto da biodiversidade global, representando cerca de 50% das florestas tropicais do globo terrestre (MALHI, 2010). Segundo

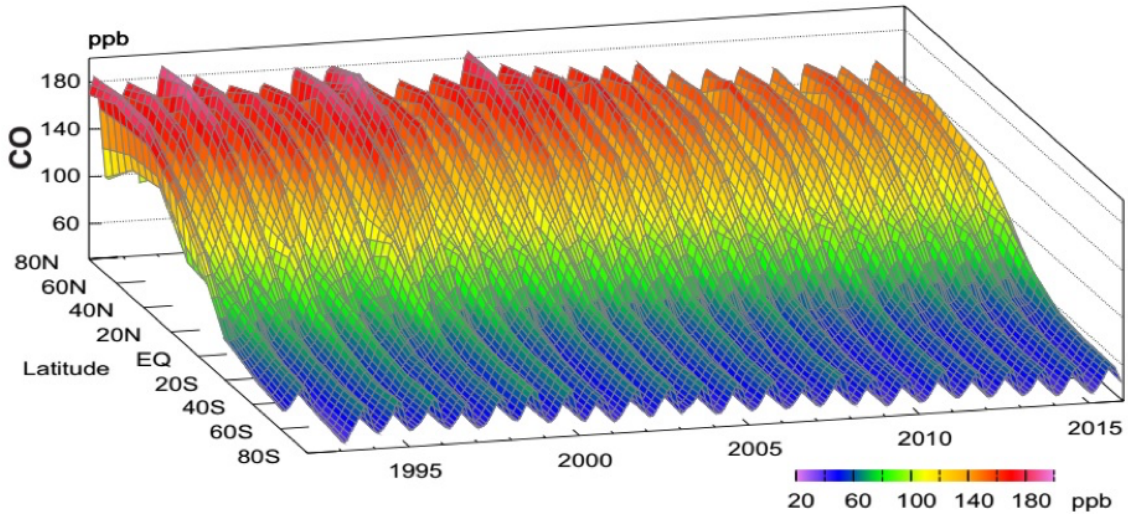
GLOOR et al., 2012, esta quantidade de carbono armazenada pela floresta representa aproximadamente metade do total de Carbono contido na atmosfera antes do início da Revolução Industrial no século 18, com o potencial de ser rapidamente liberado para a atmosfera pelo desflorestamento e queimadas.

Estas ocorrem de diferentes formas em florestas, influenciadas diretamente pelas características próprias dos locais submetidos à queima, em relação com o clima, vento, topografia, condições meteorológicas, o tipo de bioma, que podem gerar emissões em diferentes estágios pela queima ou combustão incompleta, gerando maiores ou menores emissões de CO como subproduto desta (LEEUWEN; WERF, 2011) e, desta forma, fazendo do CO um excelente traçador de queimadas (YURGANOV et al., 2010; GATTI et al., 2010; ANDREAE et al., 2012; GATTI et al., 2014).

O monóxido de carbono não é considerado um gás de efeito estufa pois dificilmente absorve radiação infravermelha emitida da Terra, no entanto, é parte importante no ciclo carbono global, uma vez que afeta outros GEE (WMO, 2018). Gera interesse em seu ciclo atmosférico como um produto da foto-oxidação do CH_4 e de COVs (Compostos orgânicos voláteis), com o maior sumidouro atmosféricos sendo o radical Hidroxila (OH^-) e, como precursor de ozônio troposférico (LOGAN et al., 1981). As maiores fontes mundiais de CO são as emissões industriais (de 500 a 900 Tg ano^{-1}), oxidação do CH_4 (de 700 a 900 Tg $^{-1}$) e a queima de biomassa (de 400 a 800 Tg ano^{-1}) (ANDREAE et al., 2012).

O CO é um gás que possui tempo de vida relativamente curto na atmosfera, variando desde 10 dias no verão nos trópicos até mais de um ano no inverno nas regiões polares, não ocorrendo acumulação das emissões antrópicas na atmosfera. No entanto, a distribuição desigual das fontes causam grandes variações espaciais e temporais na concentração de CO (WMO, 2018), como observa-se na Figura 3.6, cuja variação sazonal com maior amplitude ocorre no Hemisfério Norte, e com menor amplitude no Hemisfério Sul.

Figura 3.6 - Variação sazonal global de CO.



Fonte: (WMO, 2018)

As variações sazonais de CO, com um grande gradiente latitudinal, deve-se à presença de numerosas antropogênicas fontes de CO nas latitudes médias setentrionais, combinadas com a destruição química de CO nos trópicos, onde os radicais OH^{-1} são abundantes (WMO, 2018) e as principais fontes sendo pelas emissões do solo provenientes da decomposição e oxidação lenta da biomassa em derrubadas e, obviamente, a contribuição por meio da LUC, principalmente em processos de queimadas (ANDREAE et al., 2012; HOUGHTON et al., 2012; GLOOR et al., 2012; SHIMABUKURO et al., 2013; GATTI et al., 2014).

Este que é um fenômeno global e praticado desde a antiguidade como meio de ocupação humana bem como por processos naturais, consome grandes porções de vegetação e modifica as características da superfície terrestre (SHIMABUKURO et al., 2013). Durante as últimas cinco décadas é utilizada vastamente nos trópicos e está envolvida nos processos de degradação de florestas e desmatamento (CRUTZEN; ANDREAE, 1990; BUSTAMANTE et al., 2016). Extensivas atividades com queimadas, modificam o sistema ambiental como um todo gerando a degradação do solo, mudanças na fauna e flora, diminuindo assim a biodiversidade e afetando inclusive os humanos (FEARNSIDE, 2005). Este processo não produz efeitos apenas regionais, devido a alta eficiência no transporte atmosférico de gases traço e aerossóis e, também, ao calor produzido, os efeitos das queimadas possuem uma escala global (KAUFMAN et al., 1995; MARTIN et al., 2010; HOUGHTON et al., 2012; GATTI et al., 2014; DEETER et al., 2016), desta forma as LUC nos países tropicais contribuem significativamente para as emissões de GEE e desempenham um papel importante na mudança do clima global (ARAGÃO et al., 2018).

Neste mesmo trabalho, o autor aponta uma importante constatação sobre as emissões de Carbono em florestas tropicais, que mesmo às emissões provenientes diretamente de áreas em processo de desflorestamento apresentarem índices de queda (vide Figura 3.5), a incidência de incêndios, durante anos secos, e as emissões de Carbono associadas à modificações antrópicas, aumentaram (ARAGÃO et al., 2018), haja vista, a grande emissão de Carbono reportada em (GATTI et al., 2014), 2014, com uma contribuição total resultante à atmosfera da Bacia Amazônica igual a 0,51 $\pm$ 0,12 PgC ano^{-1} no ano de 2010, reconhecidamente um ano seco.

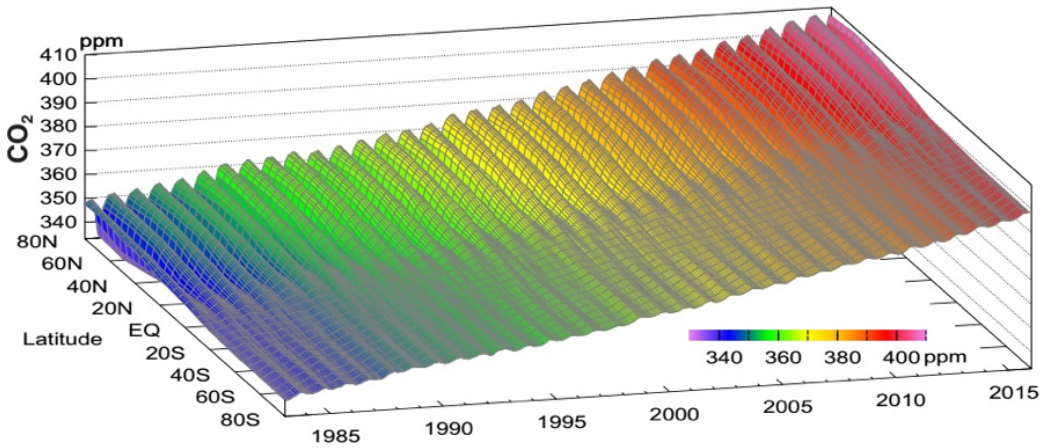
Uma das formas para estimar as emissões provenientes da queima de biomassa é a utilização do CO como traçador de queimadas para a realização das razão CO:gás (GATTI et al., 2010; ANDREAE et al., 2012; DOMINGUES, 2013; CORREIA, 2013; GATTI et al., 2014). ANDREAE et al., 2012, destaca que, dada a importância das emissões provenientes da queima de biomassa nos trópicos, surpreende a existência de poucos estudos de razões de emissão para o cálculo da contribuição de Carbono, para o qual utiliza-se o CO juntamente com medidas de CO_2, por sua importância no balanço de Carbono global. Os valores das razões CO:CO_2 apresentam grande variação na literatura iniciando em 61 $\pm$ 17 ppb/ppm (GUYON et al., 2005) até 159 ppb/ppm (YOKELSON et al., 2008).

As amostragens com grande precisão do CO_2 atmosférico foram iniciadas por Charles David Keeling no ano de 1958, gerando uma série histórica das modificações na composição atmosférica (IPCC, 2007). No período pré-industrial em 1750, a concentração do CO_2 registrada era de cerca de 280 ppm (NOAA, 2013) e desde então sofreu um aumento de 45%, alcançando no ano de 2016 a máxima de 403,3 $\pm$ 0,1 ppm. Um aumento de 3,3 ppm em relação ao ano de 2015, valor este considerado maior que o aumento de 2012 – 2013, e 50% maior que a taxa de crescimento da última década de 2,2 ppm. Esse crescimento deve-se, em parte, ao aumento das emissões naturais relacionado ao evento mais recente do fenômeno "*El Niño*" (WMO, 2016).

O processo do acúmulo de fontes e sumidouro ocorridos ao longo da história mundial, representam os atuais níveis de concentração de CO_2. Este possui uma longa vida na atmosfera, em estado estável durante décadas ou séculos, já que não há um tempo de vida estimado para este gás por possuir um processo permanente de reciclagem na atmosfera, oceanos e solo, devido à eventos emissões e absorções com diferentes escalas de magnitude e tempo, resultando em grandes variações sazonais em sua resultante atmosférica (IPCC, 2014). Como vê-se na 3.7, ocorre uma menor variação de sua resultante atmosférica no Hemisfério Sul,

quando comparadas ao Hemisfério Norte.

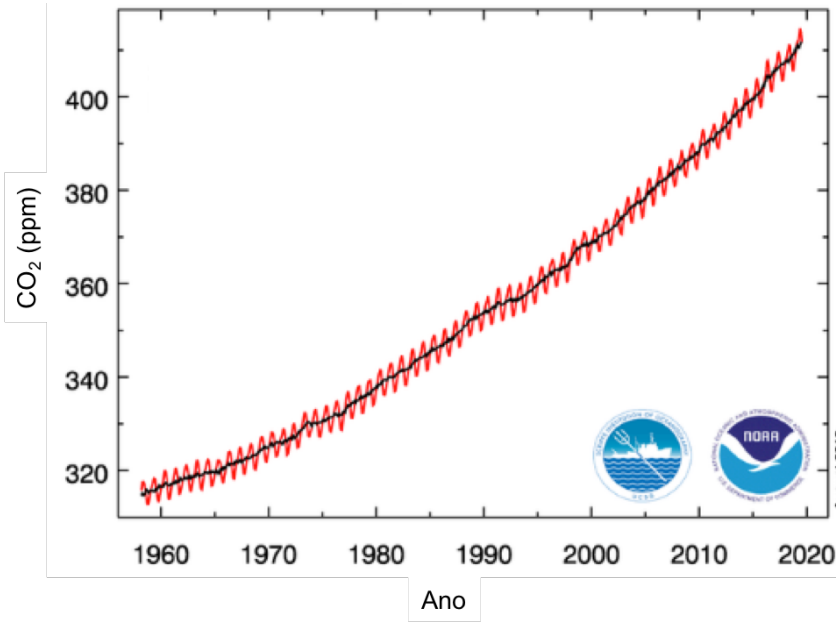
Figura 3.7 - Variação sazonal global de CO_2.



Fonte: (WMO, 2016)

No dia 9 de maio de 2013, medidas realizadas no Observatório de Mauna Loa, iniciadas no ano de 1958, ultrapassaram pela primeira vez a marca de 400 ppm. Até julho de 2019 a concentração observada de CO_2 era igual a 411,77 ppm enquanto no mesmo mês de 2018, foi registrada uma concentração igual a 408,71 (NOAA, 2013), indicando novamente o rápido crescimento em suas concentrações atmosféricas. Na Figura 3.8 pode-se observar o histórico atualizado até agosto de 2019 das medidas de CO_2 no Observatório de Mauna Loa.

Figura 3.8 - CO_2 atmosférico em medidas no Observatório de Mauna Loa.

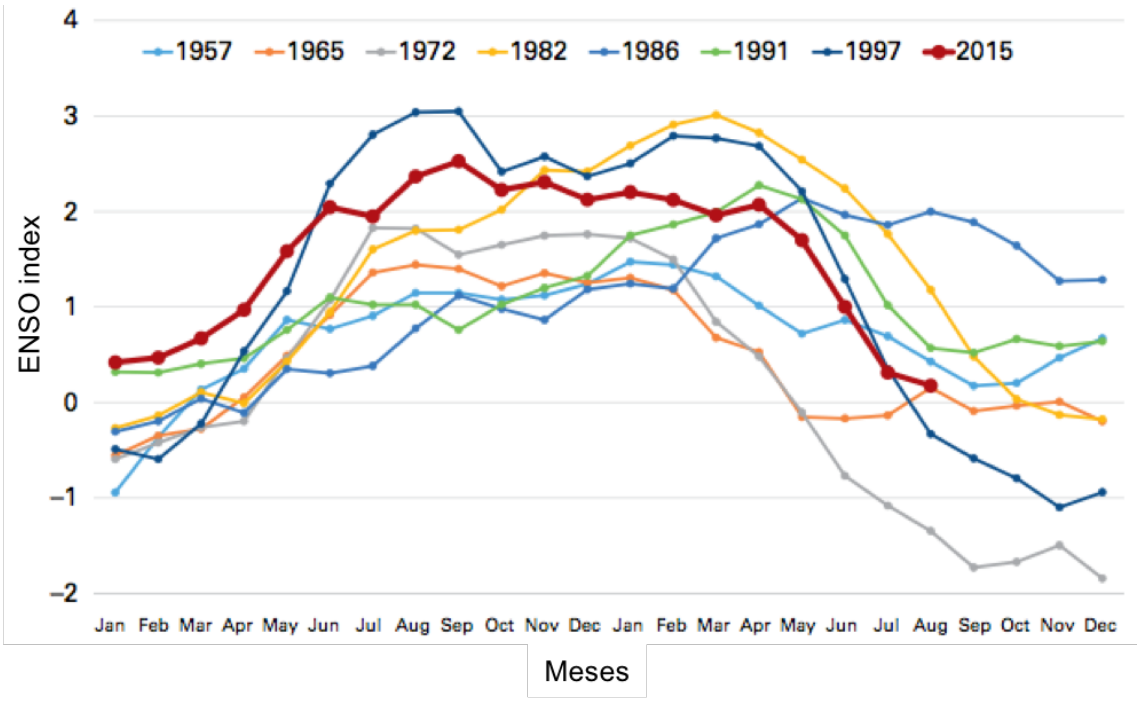


Fonte: (NOAA, 2019a).

Outra importante variável nos processos de emissão é a ocorrência do fenômeno "*El Niño*", definido como uma variação natural do sistema climático. Ocorre quando há uma acumulação anômala de águas com elevadas temperaturas no Oceano Pacífico Equatorial. Esse evento é associado a padrões climáticos anômalos, como fortes tempestades e secas ou inundações em diferentes locais. Um evento típico do fenômeno tem uma duração de 9 meses a 2 anos, repetindo-se em intervalos de aproximadamente 2 a 7 anos. Relaciona-se o "*El Niño*" à processos de enriquecimento atmosféricos, justamente pela característica em ocasionar fortes secas, diminuindo assim, o potencial de absorção de carbono pela vegetação e, contribuindo para o aumento de eventos de queimadas que, consequentemente, colabora com emissões de CO_2 à atmosfera (WMO, 2016). Nas Figuras 3.9 e 3.10 pode-se comparar a influência do fenômeno "*El Niño*" na taxa de crescimento anual de CO_2.

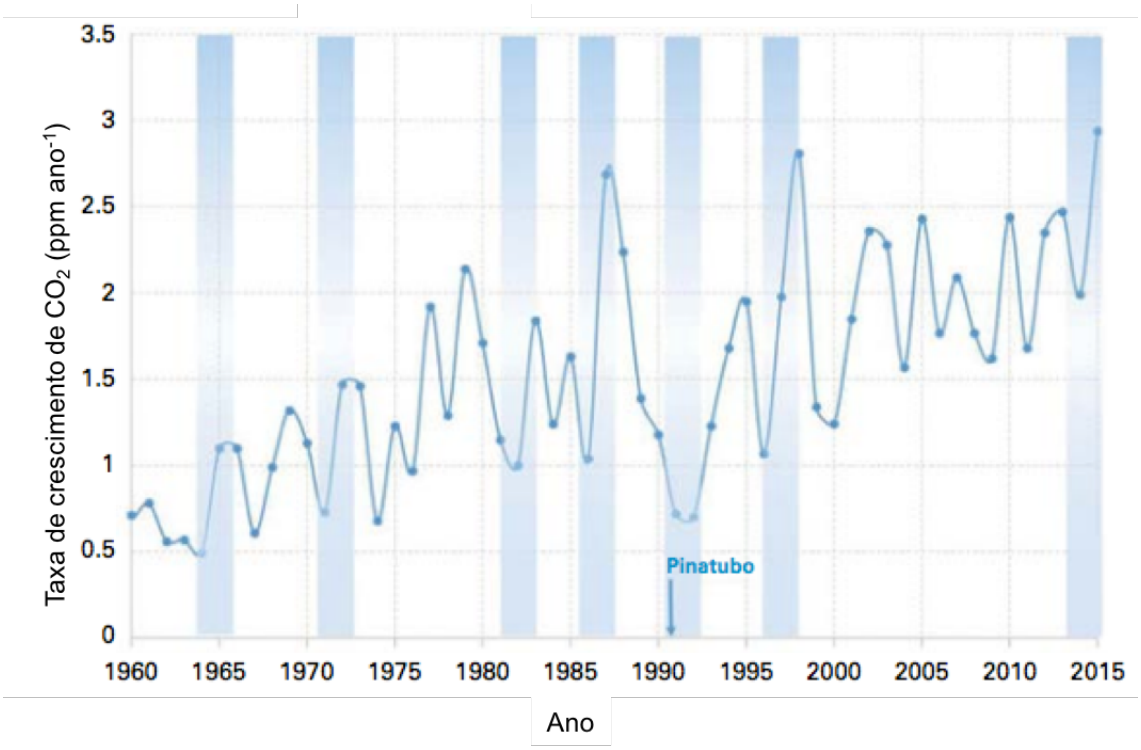
Nestas, vê-se os eventos de "*El Niño*" mais intensos desde 1950 com unidade denominada ENSO index (3.9, índice desenvolvido pela NOAA, é a série temporal de função ortogonal empírica combinada com cinco variáveis diferentes (pressão ao nível do mar, temperatura da superfície do mar, componentes zonais e meridionais do vento de superfície e radiação de ondas longas de saída sobre a bacia tropical do Pacífico (30ºS - 30ºN e 100ºL - 70ºO) (NOAA, 2019b)) juntamente com os picos da taxa de crescimento anual de CO_2 destacadas em azul, congruentes aos eventos do fenômeno, excluindo-se o ano de 1991 quando ocorreu a erupção do Monte Pinatubo. Na série histórica dos oito maiores eventos do fenômeno, consta o ano de 2015-2016, associado a recordes de temperaturas globais e sendo período presente neste trabalho (WMO, 2016) doravante apresentado.

Figura 3.9 - Anos com os maiores Enso index registrados desde 1950.



Fonte: Adaptado de (WMO, 2016).

Figura 3.10 - Taxa de crescimento global anual de CO_2.



Fonte: Adaptado de (WMO, 2016).

4 METODOLOGIA

4.1 Amostragem

Durante o período de 2010 a 2016 foram realizados cerca de 500 perfis verticais resultando em mais de 5000 amostras sobre os locais: Santarém (SAN – 2.86ºS 54.9ºW) no Estado do Pará, Alta Floresta (ALF – 8.80ºS 56.7ºW) no Estado do Mato Grosso, Rio Branco (RBA - 9.38ºS 67.6ºW) no Estado do Acre, Tabatinga (TAB – 5.96ºS 70.1W) no Estado do Amazonas, o qual foi desativado no ano de 2013, e Tefé (TEF – 3.31ºS 65.8ºW), iniciado em 2013 em substituição a TAB, utilizando aviões de pequeno porte, entre as altitudes de 300 a 4400 metros relativas ao nível do mar. Nos anos de 2012 e 2013 foram realizados perfis altos em RBA para estudo de perda de informação acima do teto de 4500 metros, alcançando uma altitude máxima de cerca de 6500 metros. A Figura 4.1 ilustra a localização dos pontos de amostragem e também das ilhas de Ascension (ASC – 7º56'S, 14º22'O), Barbados (RPB – 13º10'N, 59º32'O) e Cape Point (CPT – 34º21'S, 18º29'L). As datas de realização de cada perfil podem ser observadas nas Tabelas 8.1, 8.2, 8.3 e 8.4 contidas no Anexo A.

Figura 4.1 - Localizações dos pontos de amostragem georreferenciados, marcados em azul pelo ícone dos aviões e seus respectivos nomes e também ASC, RPB e CPT com o ícone rosa. Em vermelho vê-se a delimitação da Amazônia Legal.

Fonte: Google Earth®.

Foram contratados aviões de pequeno porte, de empresas presentes nos locais de amostragens, para a realização das coletas de ar em perfis verticais. Os aviões foram equipados com um sistema semi-automático de amostragem desenvolvidos pelo GMD/ESRL/NOAA (*Global Monitoring Division / Earth System Research Laboratory / National Oceanic Atmospheric Administration*). Este sistema é constituído por duas unidades, a primeira, denominada como PFP (*Programmable Flask Package*)responsável pela armazenagem das amostras coletadas.

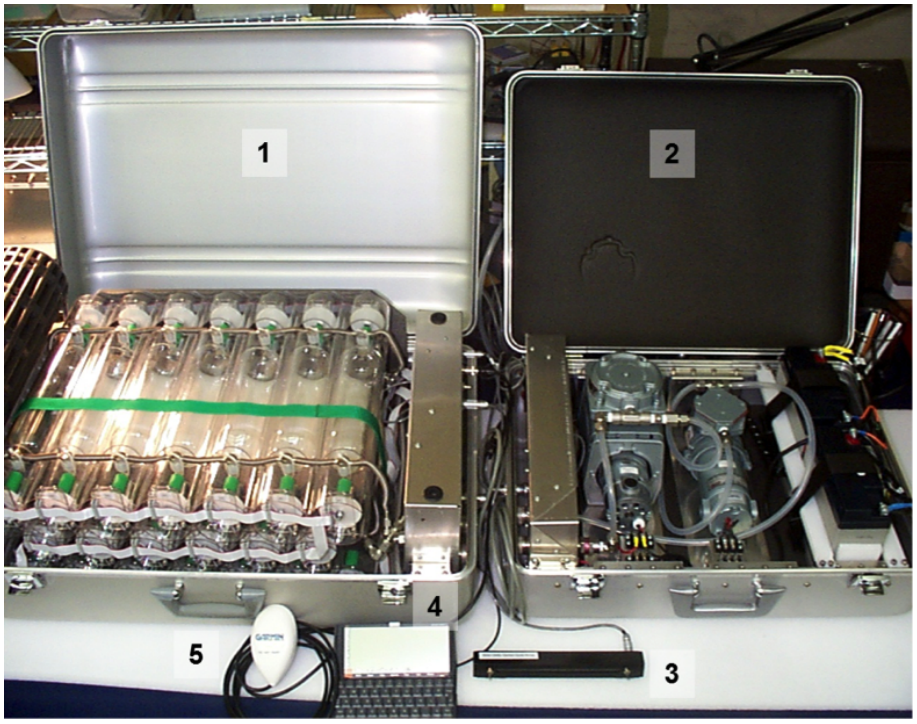
A PFP possui duas diferentes versões: A primeira (versão 2, fabricada anteriormente pela NOAA) (Figura 4.2) contém 17 frascos de vidro e a segunda (versão 3 fabricada pela HPD – *High Precision Device*®) (Figura 4.3) com 12 frascos de vidro. Estas são compostas por frascos de vidro de borossilicato de 0,7 litros, um sistema de coletor de aço inoxidável (*manifold*), válvulas de vidro seladas com anéis de vedação de Teflon® e um sistema de registro e controle de dados. Os frascos cilíndricos de 7,5 cm de diâmetro têm válvulas de vidro em cada extremidade e são alocados em duas filas de seis na versão 3 e em três filas de seis, cinco e seis frascos na versão dois com 17 frascos de vidro. Um coletor de aço inoxidável flexível conecta todos os frascos em paralelo no lado de entrada dos frascos. As válvulas nas duas extremidades dos frascos podem ser abertas e fechadas com válvulas controladas por motor. O mecanismo da válvula é feito de uma haste de vidro e um *o-ring* de Teflon, que é vedado contra uma de válvula de vidro chanfrada quando inserida no corpo da válvula. O sistema de registro e controle de dados nas unidades fornece a interface para controlar as válvulas de amostragem, bem como para armazenar um plano de amostragem e um volume de descarga desejado e uma pressão de enchimento para as amostras. Os volumes reais de descarga de amostra e as pressões de coleta durante a amostragem são registrados pelo registrador de dados, juntamente com o status do sistema e um registro de data e hora (NOAA, 2016).

A segunda unidade do sistema, também dividida em versão 2 e 3, é denominada como PCP (*Programmable Compressor Package*) (Figuras 4.2 e 4.3). Esta utiliza um sistema que contém dois compressores e baterias recarregáveis para que o ar atmosférico seja pressurizado a 40 psi (276 KPa) nos frascos de vidro da PFP. A bomba de primeiro estágio (KNF Modelo N828 com cabeçote de alumínio e diafragma de Viton) é projetada para garantir vazões de pelo menos 5L min^{-1} a 8000 metros acima do nível do mar e 15L min^{-1} ao nível do mar. A bomba de segundo estágio (KNF Modelo N814 com cabeçote de alumínio e diafragma Viton) foi projetada para garantir que as amostras possam ser comprimidas de forma confiável a 40 psia em altitudes de até 8000 metros. A PCP é alimentada por uma bateria recarregável de níquel-hidreto de metal (NiMH), que permitem a pressuriza-

ção dos frascos (NOAA, 2016). Durante a coleta, são passados inicialmente 5 litros de ar pelo tubo de entrada e pela ligação entre os frascos amostradores (*manifold*) para o condicionamento deste tubo com as condições de umidade e concentração dos gases. Na etapa seguinte são passados 10 litros de ar para o condicionamento do vidro dos frascos. Então a válvula de saída do frasco é fechada e quando o sensor de pressão identifica 40 psi a válvula da frente também é fechada, armazenando assim de 1,4 a 1,7 litros de amostra por frasco/altura.

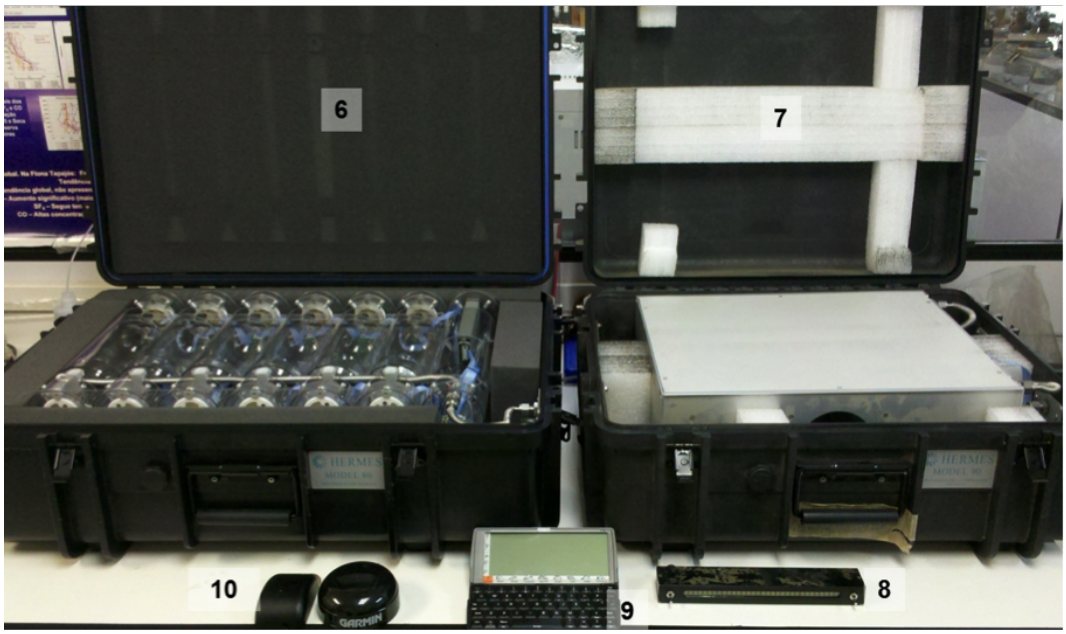
Juntamente com o sistema descrito acima, são também adicionados ao avião um tubo coletor de aço inoxidável posicionado de modo que as emissões oriundas do motor da aeronave não interfiram na coleta. Este pode ser instalado na janela de mau tempo do avião ou nos dutos de entrada de ar para a cabine localizado nas asas do avião. Foram também adicionados sensores de temperatura, umidade relativa e GPS (*Global Positioning System*) para registrar o posicionamento e as condições de cada coleta. Quando a posição do GPS, temperatura ambiente, pressão e umidade relativa estão disponíveis a partir de sensores externos, esses valores também são registrados pelo registrador de dados em intervalos de 10 segundos. Nas Figuras 4.2 e 4.3 pode-se observar as versões completas do sistema.

Figura 4.2 - Sistema de amostragem de ar versão 2 utilizados em Santarém e Rio Branco, onde: 1) PFP com 17 frascos de vidro; 2) PCP; 3) Painel do piloto; 4) Minicomputador; 5) GPS.



Fonte: Produção do autor.

Figura 4.3 - Sistema de amostragem de ar versão III, utilizado em Rio Branco, Tabatinga e Alta Floresta, onde: 6) PFP com 12 frascos de vidro; 7) PCP; 8) Painel do piloto; 9) Minicomputador; 10) GPS (2 modelos utilizados).



Fonte: Produção do autor.

Para atingir a melhor condição de repetibilidade de condição atmosférica, as amostragens foram realizadas entre 12:00 e 13:00 no horário local, pois é o período de maior estabilidade da troposfera e quando a camada limite encontra-se próxima a sua máxima altitude (BASSO et al., 2016).

4.1.1 Rotina de Amostragem

Nas Figuras 4.4, 4.5 e 4.6, pode-se observar os aviões responsáveis pelas amostragens com o sistema de coleta de ar instalado, com o tubo coletor em detalhe. Na Figura 4.4, o avião modelo Seneca II, utilizado em Rio Branco e Tabatinga. Na Figura 4.5, o avião utilizado em Santarém, modelo Sertanejo e, na Figura 4.6, o avião utilizado em Alta Floresta, modelo Cessna 210, onde nota-se a diferença no posicionamento do tubo coletor que, diferentemente dos outros modelos que propiciaram a instalação do mesmo em sua janela de mau tempo, no Cessna 210, possibilitou somente a instalação do tubo coletor na asa, na entrada da ventilação. Na amostragem, a aeronave descreve um voo com trajetória pré-determinada, de forma que cada amostra seja coletada em determinada posição fixa geograficamente, porém em diferentes altitudes.

Figura 4.4 - Avião utilizado para a amostragem em Rio Branco e Tabatinga, modelo Seneca II, e em detalhe, indicado pelas setas vermelhas, o tubo coletor e a acomodação do sistema de coleta.

Fonte: (DOMINGUES, 2013)

Figura 4.5 - Avião, modelo Sertanejo, utilizado para a realização das amostragens em Santarém e, em detalhe, indicado pelas setas vermelhas, o tubo coletor e a acomodação do sistema de coleta.

Fonte: (DOMINGUES, 2013).

Figura 4.6 - Avião Cessna 210, utilizado na amostragem em Alta Floreta, e, em detalhe, indicado pelas setas vermelhas, a localização do tubo coletor e a acomodação do sistema de amostragem.

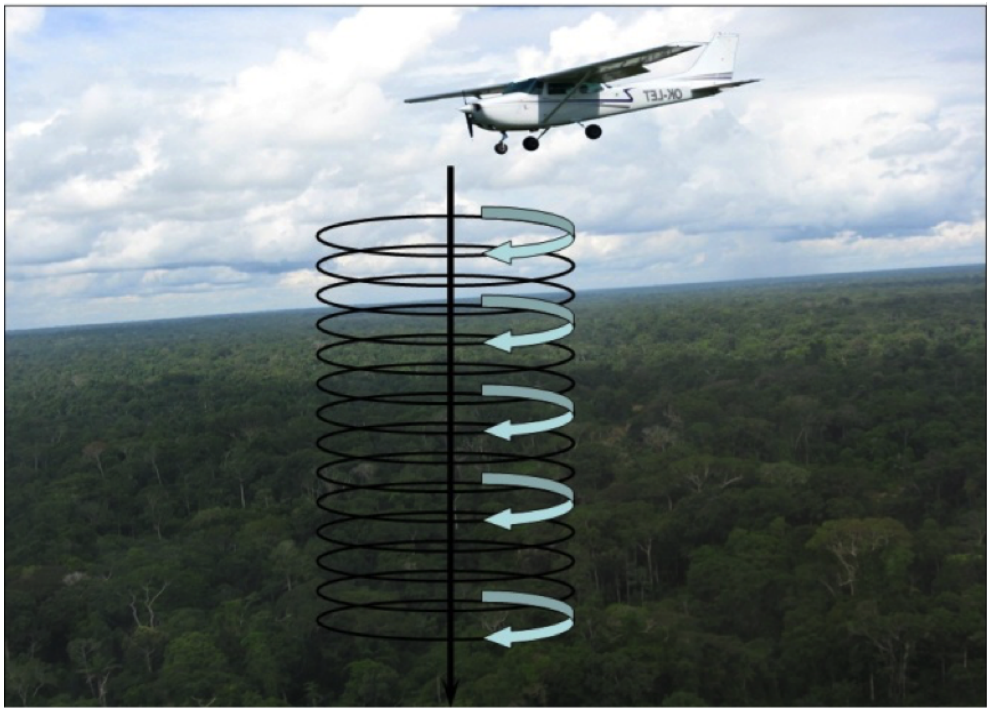
Fonte: (DOMINGUES, 2013).

Os locais de amostragem possuem uma PCP e recebem mensalmente duas PFPs para a realização dos perfis que são pré-programadas com um plano de amostragem/voo específico do local que inclui as altitudes alvo para cada amostra, o plano de voo para cada local de amostragem pode ser observado na Tabela 4.1. A trajetória do avião é realizada em formato helicoidal descendente, com diâmetro em torno de 5 km, na Figura 4.7 pode-se observar um esquema da trajetória realizada pela aeronave. Esta estratégia de amostragem é realizada para evitar a influência do gás emitido pelo motor do avião na coleta e, também, para que a coleta ocorra em um plano nivelado, variando apenas as altitudes. As altitudes de coleta ocorrem em relação ao nível do mar e o ponto mais alto é 14500 pés (4420 metros) para todos os locais. Antes de um voo, o sistema é primeiramente testado quanto a vazamentos (*System test*), ambientando o *manifold* interno do frasco e, em seguida, pressurizando a 40 psia. Após 10 segundos, a pressão é verificada para garantir que não haja vazamentos significativos na tubulação que conecta o ambiente externo à PCP, as mangueiras entre a PCP e a PFP, e o *manifold* interno que conecta todos os frascos individuais.

Tabela 4.1 - Plano de voo utilizado por local de amostragem em pés e metros com as versões do sistema 2 (V2) e 3 (V3).

	Santarém/ Rio Branco (V2)		Alta Floresta (V3)		Tabatinga/Tefé (V3)		Rio Branco (V3)	
Frasco	Altitude (pés)	Altitude (metros)	Altitude (pés)	Altitude (metros)	Altitude (pés)	Altitude (metros)	Altitude (pés)	Altitude (metros)
1	14500	4420	14500	4420	14500	4420	14500	4420
2	13500	4115	13500	4115	13000	3392	13000	3392
3	12500	3810	11500	3505	11500	3505	11500	3505
4	11500	3505	10000	3048	10000	3048	10000	3048
5	10500	3200	8500	2591	8500	2591	8500	2591
6	9500	2896	7000	2134	7000	2134	7000	2134
7	8500	2591	6000	1829	6000	1829	6000	1829
8	7500	2286	5000	1524	5000	1524	5000	1524
9	6500	1981	4000	1219	4000	1219	4000	1219
10	5500	1676	3000	914	3000	914	3000	914
11	4500	1372	2000	610	2000	610	2000	610
12	3500	1067	1500	457	1000	305	1000	305
13	3000	914	*	*	*	*	*	*
14	2500	762	*	*	*	*	*	*
15	2000	610	*	*	*	*	*	*
16	1500	457	*	*	*	*	*	*
17	1000	305	*	*	*	*	*	*

Figura 4.7 - Esquema da trajetória realizada pela aeronave em trajetória helicoidal descente.



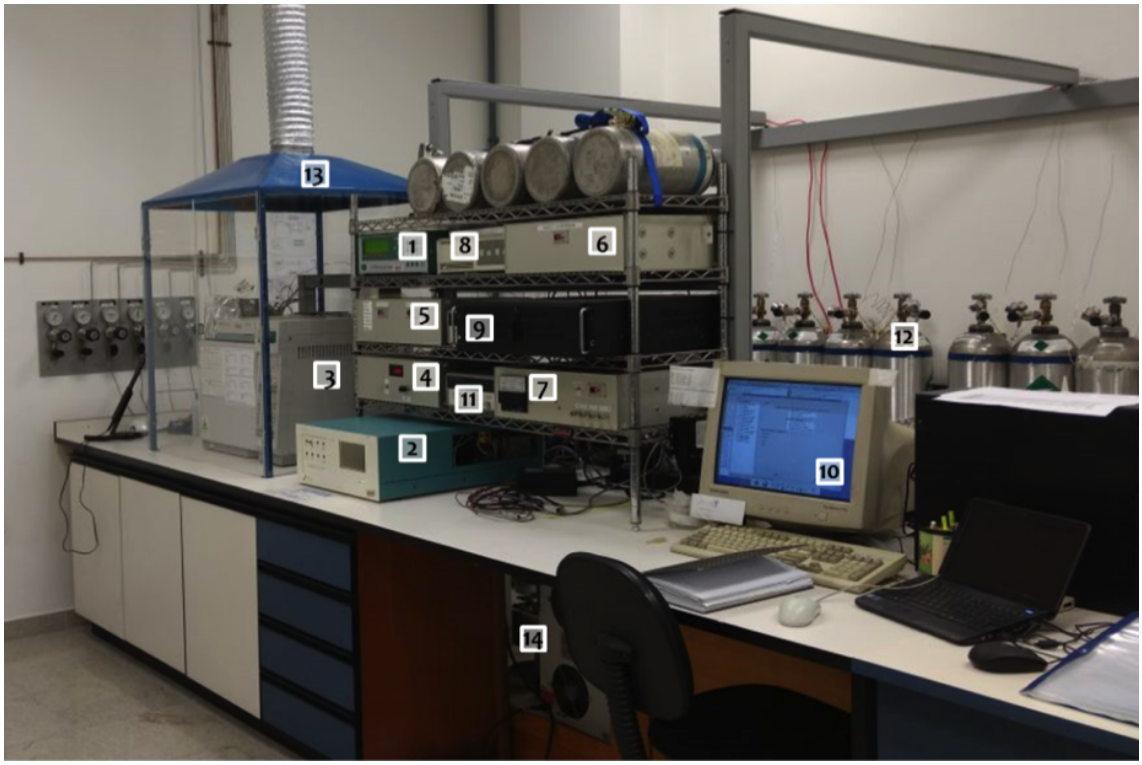
Fonte: Produção do autor.

A PCP é conectada a um painel do piloto, um *display* alfanumérico de LED e uma chave seletora, que comunica as altitudes de amostragem alvo ao piloto. Uma vez que o piloto atinge cada altitude, ele ativa a chave seletora durante o voo nivelado e espera até que a amostragem termine. Para cada amostra, a linha de entrada e o coletor interno são primeiro lavados com cerca de 5 litros de ar ambiente. As válvulas em ambas as extremidades do frasco selecionado são então abertas e o frasco é lavado com cerca de mais 10 litros de ar ambiente para deslocar o gás de preparação seco, com baixa concentração de CO_2 (cerca de 330 umol mol^{-1}) com o qual os frascos foram enviados. O fluxo de lavagem da amostra é medido por um fluxômetro de massa para garantir que um volume suficiente passe através do coletor e do frasco, antes que a válvula a jusante esteja fechada e a pressurização comece. Normalmente, a pressurização deste dura 10 segundos e é monitorada por um sensor interno de pressão absoluta. Assumindo uma taxa de fluxo de 5 L min^{-1}, que pode ser observada a 8000 metros em um plano pressurizado, e uma mistura perfeita em todo o volume do frasco, 99% do volume de 0,35 litros serão liberados nos últimos 20 segundos do ciclo de descarga. Um adicional de cerca de 1,55 litros de amostra será adicionado uma vez que a válvula de frasco a jusante tenha sido fechada, fazendo com que o tempo total de amostragem seja inferior a 40 segundos para coletar 99,9% da amostra (NOAA, 2016).

4.1.2 Quantificação dos gases

Em 2003, foi construída uma réplica do sistema para análise dos gases dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), monóxido de carbono (CO), óxido nitroso (N_2O), hidrogênio (H_2) e hexafluoreto de enxofre (SF_6) (Figura 4.8), denominado SAGEE (Sistema de Análise de Gases de Efeito Estufa), desenvolvido pelo ESRL/NOAA, pelo Dr. Ed Dlugokencky e executado por Dr. Andrew Crotwell e Dra. Luciana Vanni Gatti. Esta réplica foi instalada no Instituo de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) em 2004, quando passou a realizar todas as análises de GEE. Em 2015 o SAGEE foi realocado ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Figura 4.8 - SAGEE no CCST/INPE. Onde: 1) Monitor LI-COR (CO_2); 2) Monitor de CO/H_2 Peak Laboratories (CO/H_2); 3) Cromatógrafo gasoso HP ($N_2O/SF_6/CH_4$); 4) Controlador de fluxo dos gases; 5) Válvula "*Sample select e System select*"; 6) sample/CO reference; 7) Medidor de vácuo e Receptor de amostras; 8) Interface do cromatógrafo; 9) Central única de processamento; 10) Tela operacional; 11) Interface do monitor de CO/H_2; (CPU); 12) Gases referência e curva de calibração; 13) Sistema de exaustão para cromatógrafo; 14) Banho resfriador.

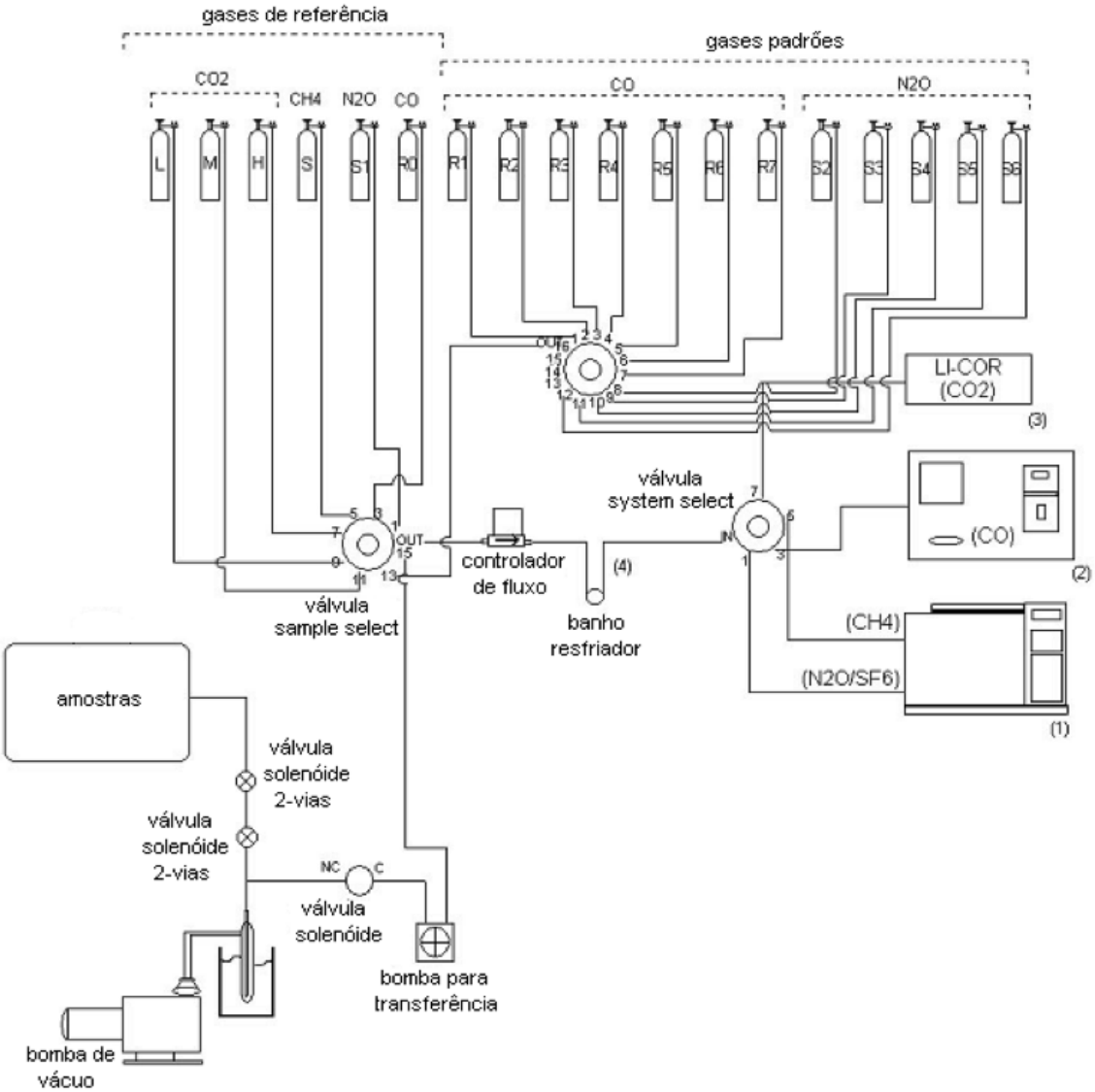


Fonte: Produção do autor.

O SAGEE é um sistema totalmente integrado e automático para a análise dos gases, possui um sistema de operação no qual a quantificação das amostras ocorre de forma alternada à quantificação dos gases de referência, assim aumen-

tando a acurácia nas análises. Na Figura 4.9 pode-se observar o esquema de funcionamento do sistema onde três válvulas de múltiplas posições compõem o sistema de separação dos gases de referência e amostras para os respectivos instrumentos de análise. Estas são válvulas que possuem diversas conexões de entrada e somente uma saída, permitindo a passagem somente de um gás por vez, a partir de sua seleção. A válvula *sample select*, é responsável pela alternação entre gases de referência e amostra. A válvula *sample/CO reference*, a qual possui 16 posições, é utilizada nas calibrações do sistema nas curvas de calibração e nas análises dos *target tanks* para avaliação da acurácia do sistema. Já a válvula *system select* possui apenas uma entrada e várias saídas que permitem o direcionamento de cada gás para o equipamento específico de análise.

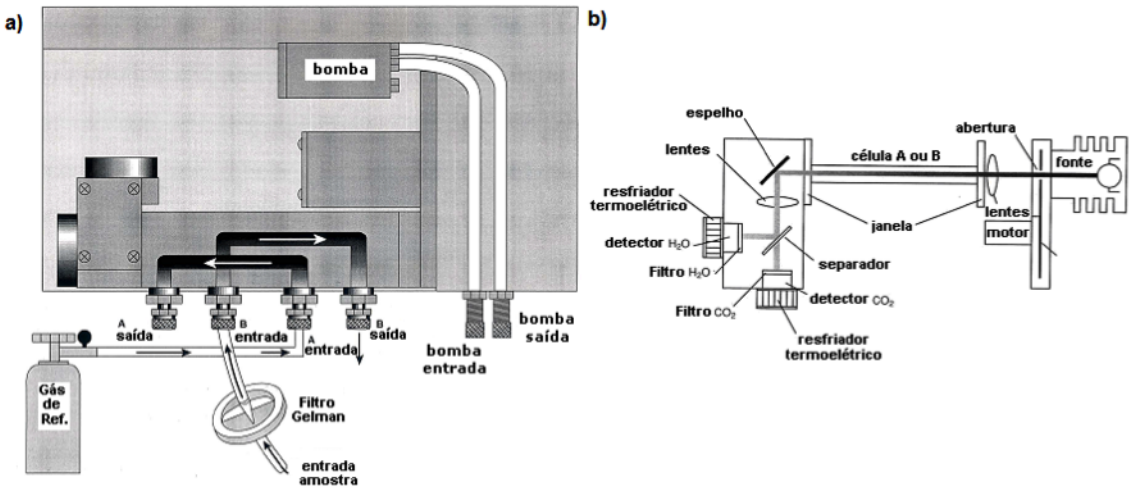
Figura 4.9 - Esquema de montagem de sistema SAGEE.



Fonte: Manual MAGICC3/Brasil (*Multiple Analysis of Greenhouse Gases Influence Climate Change*).

Conforme descrito em Dissertação apresentada pelo autor, ”equipamento utilizado para análise do CO_2, da marca LI-COR®, modelo LI-7000®. É um analisador de gás infravermelho, diferencial, não dispersivo de alta precisão (NDIR). A fonte de infravermelho contém um filamento de tungstênio e é selada a vácuo. O sistema diferencial trabalha por diferença de absorção da radiação do infravermelho, o qual passa por duas células de amostragem. Na Célula A é passado o gás de referência com concentração em torno de 350 ppm (Mistura Padrão da White Martins, recalibrado pelo SAGEE) e na Célula B é passado o gás a ser analisado. A radiação infravermelha é transmitida para as duas células e os detectores presentes nas duas células absorvem a radiação e a diferença entre a absorção em ambas as células é medida. Filtros ópticos são usados para ajustar o detector de CO_2 para absorção na banda de 4,255 mícron (banda emitida pelo CO_2) e rejeitar radiação em outra banda, aumentando a precisão do instrumento” (DOMINGUES, 2013). Na Figura 4.10, vê-se o posicionamento das células A e B e o esquema detalhado de uma célula.

Figura 4.10 - (a) Esquema de entrada e saída dos gases de referência e amostra nas células do monitor de CO_2 e (b) Esquema detalhado de uma célula.



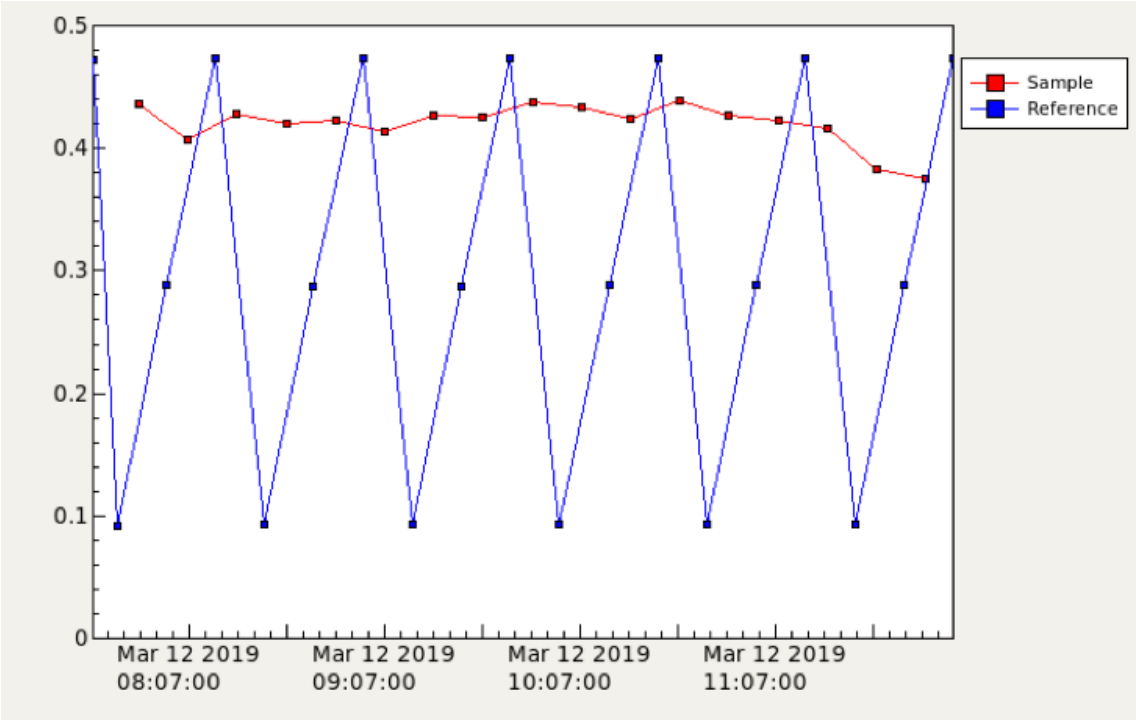
Fonte: (BORGES, 2013).

Para a garantia da acurácia nas quantificações, na análise do CO_2 é construída uma curva de calibração a cada duas amostras, onde são utilizados três gases de referência, de concentrações diferentes, para garantir alta precisão na quantificação deste gás. Neste caso, o sistema pode ser representado da seguinte maneira:

Ref.(L) – Ref.(M) – amostra – Ref.(H) – amostra – Ref.(L) – amostra – Ref.(M) – amostra - Ref.(H) – amostra – Ref.(L) – amostra – Ref.(M) – amostra –Ref.(H)

Os símbolos L, M e H significam, respectivamente, o padrão referência baixo ("*low*"), médio ("*medium*") e alto ("*high*"). Na Figura 4.11 vê-se a representação gráfica do esquema de quantificação descrito acima.

Figura 4.11 - Análise de amostras de CO_2. A cada ponto de amostra (pontos em vermelho) é realizada a calibração com as referências em três diferentes concentrações conhecidas (pontos em azul) "*low*", "*medium*" e "*high*" .

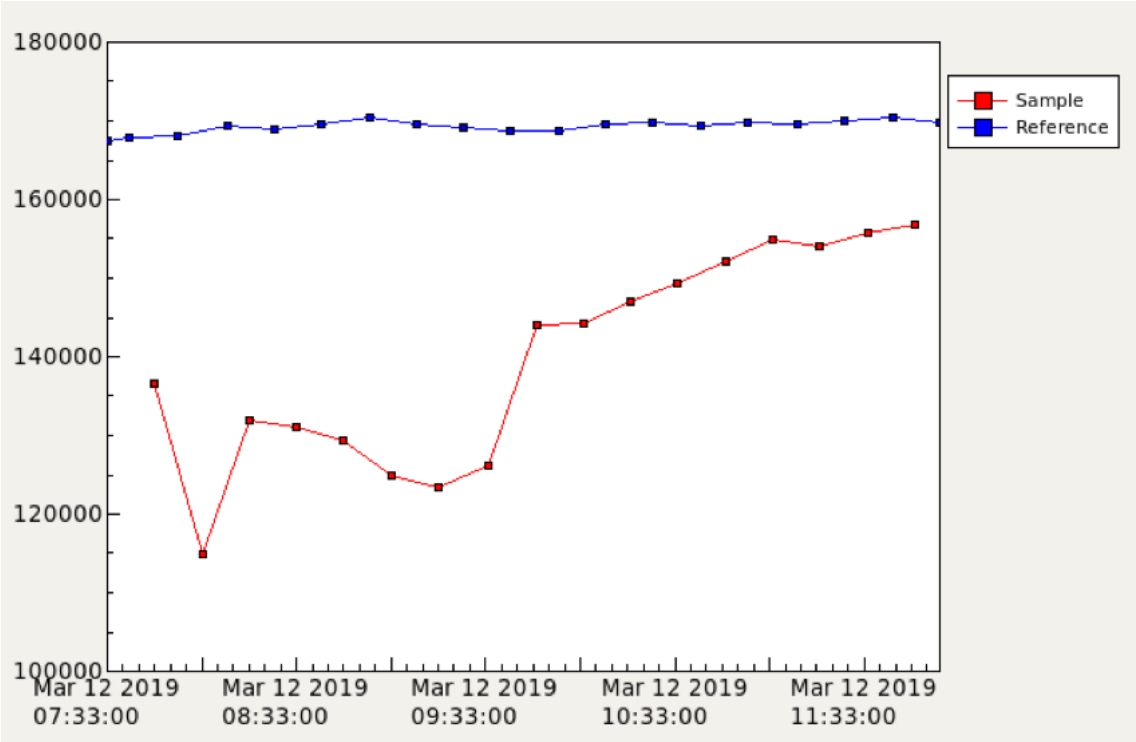


Fonte: Produção do autor.

Para garantir a estabilidade do sistema analítico, a cada 2 semanas padrao referencia calibrado pela central analitica da rede mundial NOAA, com uma concentração de 378,58 ppm de CO_2 (*target tank*) é analisado 20 vezes. A média destas 20 análises é utilizada para verificar a acurácia do sistema e o desvio padrão destas é utilizado para verificar sua precisão. Este procedimento é adotado para todos os gases analisados pelo SAGEE.

Assim como na análise de CO_2, as análises de CO são realizadas juntamente com a análise de um gás referência, no entanto é adotado somente um tanque com concentração conhecida. Na Figura 4.12 pode-se observar um exemplo de análise do gás CO juntamente com a correção de variação oferecida pela análise conjunta com o gás referência.

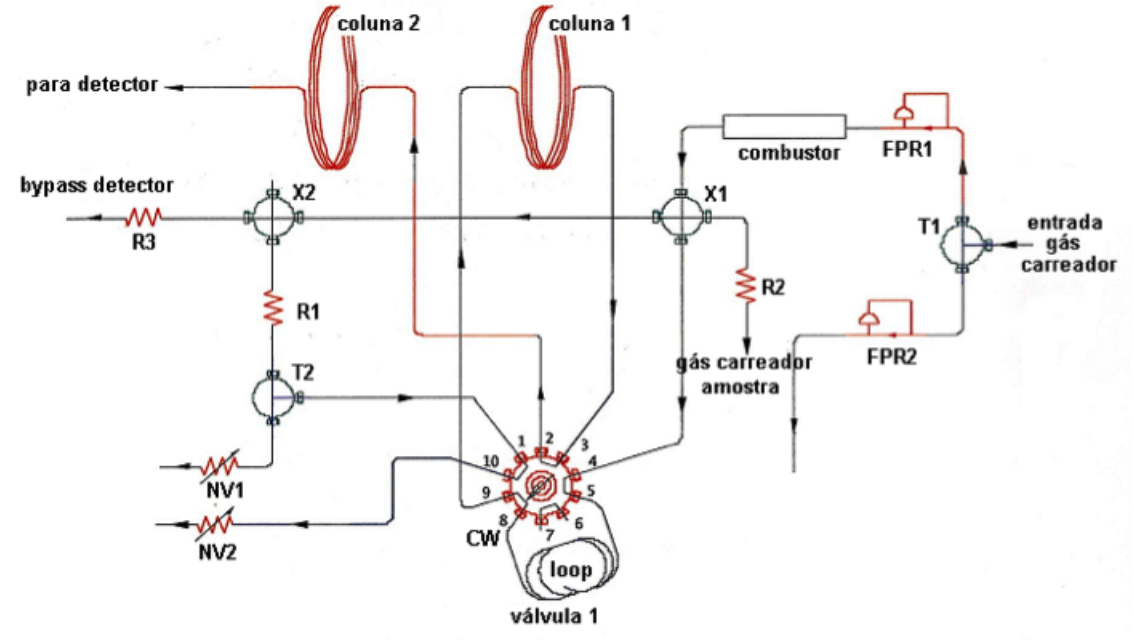
Figura 4.12 - Análise de amostras de CO. A cada pontos de amostra (pontos em vermelho) é realizado a calibração com uma referência.



Fonte: Produção do autor.

Novamente conforme descrito em Dissertação do autor, ”o instrumento que analisa o CO é o monitor da Peak Laboratories CO/H_2®. Este sistema é capaz de detectar baixas concentrações em ppb. Existe um filtro com combustor catalítico que oxida o CO presente no gás de arraste (Ar sintético) para CO_2. O gás a ser amostrado é inserido no equipamento passando pelo banho resfriador (vide Figura 4.8 item 14) para solidificação da água. O gás de arraste (20 mL min^{-1}) carrega a amostra para um sistema de pré-coluna e coluna de 1/8” de diâmetro externo situadas dentro de um forno, a 100°C. Desta coluna, o gás passa por um leito aquecido (265°C) de óxido de mercúrio (HgO), e o gás CO contido na amostra reage com o óxido de mercúrio, liberando vapor de mercúrio metálico, conforme a reação: CO + HgO (sólido) => CO_2 + Hg, que é quantificado pela absorção de luz ultravioleta na banda de 254nm, que atravessa a câmara de leitura. Pela diferença entre a radiação emitida e a que chega ao fotômetro, após entrar em contato com a amostra, tem-se um sinal proporcional à concentração de CO contido na amostra. Para uma maior precisão dos resultados, este equipamento foi regulado de forma a favorecer as análises de CO já que, apesar de analisado, os resultados de H_2 não são submetidos a estudos” (DOMINGUES, 2013). Na Figura 4.13 observa-se o esquema de injeção e funcionamento do equipamento.

Figura 4.13 - Esquema de funcionamento do monitor de CO/H_2 Peak Laboratories (CO/H_2)



Fonte: (BORGES, 2013).

Para que possíveis interferências externas nas análises sejam controladas, a sala que contém os equipamentos é mantida refrigerada à temperatura controlada, a cerca de 21°C.

4.2 Método de Integração de Coluna para cálculo do fluxo

Projetado para calcular fluxos em áreas com escala regional, o método de Integração de Coluna foi inicialmente apresentado por CHOU W.W.; SACHSE, 2002 e adaptado por MILLER et al., 2007 adicionando o uso da diferença entre a coluna de ar medida pelos perfis verticais nos dados de observação, e as concentrações dos gases no oceano (GATTI et al., 2010). Este método possibilita a integração de todo o caminho que a massa de ar percorre desde a costa até o local de amostragem, permitindo integrar os processos resultantes de fontes/sumidouros ao longo de seu trajeto.

Este método requer três fatores principais, a razão de mistura amostrada do gás, o tempo de deslocamento das massas de ar desde a costa do Brasil até o local de amostragem, que pode ser calculado por vários modelos de trajetória, e a razão de mistura da concentração de entrada (*background*, doravante denominada de BKG) que é a concentração das massas de ar com razões de mistura oceânicas, simuladas no momento em que cruzam a costa brasileira. As metodologias

utilizadas para a determinação do BKG serão demonstradas adiante na seção 4.3.

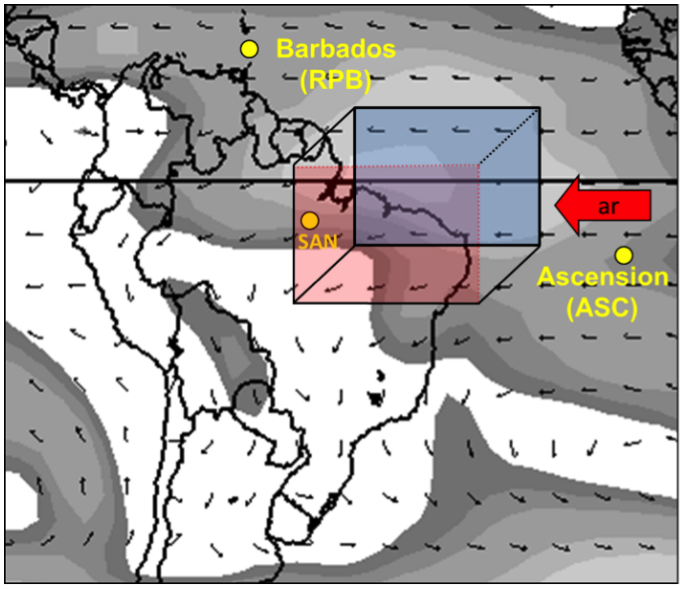
Em resumo, o método consiste em calcular o fluxo de superfície realizando a integração por altitudes (da superfície ao topo do perfil) da diferença da razão de mistura de um dado GEE obtido nas amostras e a concentração de BKG, normalizada pelo tempo de deslocamento das massas de ar desde a costa até o local da amostragem, de acordo com a Equação 4.1.

$$F_{GEE} = \frac{\int_{zf}^{zi} \left[\left(X_{gee} \right)_{site} - \left(X_{gee} \right)_{BKG} \right] dz}{t} \tag{4.1}$$

Onde $\left(X_{gee} \right)_{site}$ é a razão de mistura do GEE em estudo amostrada no perfil vertical. t o tempo de deslocamento das massas de ar desde a costa até o local de amostragem e $\left(X_{gee} \right)_{BKG}$ é a razão de mistura do BKG. Zi e Zf são as altitudes mínima e máxima, sendo mínima a cota da superfície de cada local de análise.

A Figura 4.14 nos traz uma demonstração gráfica deste método também conhecido como "*box model*", calculando as variações na concentração, desde o solo até o topo do perfil, da massa de ar que adentra ao país.

Figura 4.14 - Representação do modelo simplificado utilizado para o cálculo de fluxo pelo Método de Integração de Coluna, o qual integra a massa de ar desde o solo (face inferior do cubo em vermelho) até a 4,5 km de altitude (face superior do cubo em azul).



Fonte: (DOMINGUES, 2013).

4.2.1 Extrapolação dos resultados de fluxo para a área de análise

À partir dos dados obtidos com o fluxo em cada local de amostragem, pode-se realizar a extrapolação dos mesmos para maiores áreas (GATTI et al., 2010; GATTI et al., 2014), conforme as Equações 4.2 e 4.3:

$$F_{AI} = \frac{\sum \overline{F}_{la} \times AI_{anual}}{\sum AI_{la}} \tag{4.2}$$

Onde F_{AI} é o fluxo diário em amostragem anual extrapolado às áreas de influências, dado pela somatória das médias dos fluxos anuais nos locais de amostragem ($\overline{F}_{la}$) multiplicadas pela respectiva área de influência (AI_{anual}) e dividas pela somatória das área de influência de todos os locais de amostragem que compõem o ano calculado AI_{la}.

Após este cálculo, ocorre a extrapolação de um dia para um ano e para a área de representação da Bacia, conforme a Equação 4.3:

$$F_{esc} = \frac{F_{AI} \times A_{rep} \times 365}{U_{Pg}} \tag{4.3}$$

Onde F_{esc} é o fluxo escalonado, F_{AI} é o fluxo diário em amostragem anual extrapolado às áreas de influências, A_{rep} é a área de representatividade (Amazônia Legal, por exemplo) e U_{Pg}, a conversão de unidades para a apresentação dos resultados em Petagramas (Pg).

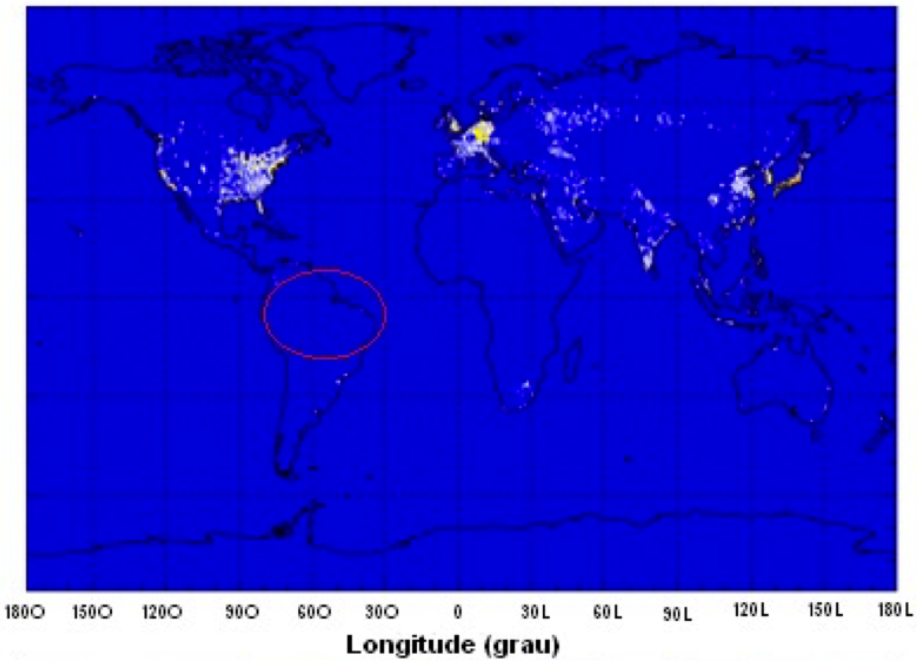
4.3 Concentração de entrada no continente (BKG)

Como observa-se na Equação 4.1, a determinação do BKG possui um alto impacto o cálculo do fluxo de gases na Bacia Amazônica, portanto atribuir valores confiáveis a esta é fator fundamental para a obtenção dos resultados finais. Neste estudo foram aplicadas duas metodologias para o cálculo do BKG, a primeira utilizando hexafluoreto de enxofre como traçador de massas de ar e a segunda, desenvolvida neste trabalho, o método utilizando a posição geográfica das massas de ar denominado de AMBaM (Air Mass Back-trajectories Method). Ambas metodologias serão detalhadas a seguir.

4.3.1 Método utilizando hexafluoreto de enxofre (SF_6)

Para o cálculo da concentração de entrada no continente (BKG) foi utilizado o gás hexafluoreto de enxofre (SF_6), como traçador de massas de ar. Neste método considera-se a inexistência de emissão do gás SF_6 dentro da área de estudo, desta forma, a razão de mistura do gás SF_6 determinada nos perfis verticais, seria a mesma de quando cruzou a costa brasileira. Na Figura 4.15 observa-se um estudo de emissões/fontes de SF_6 realizado por OLIVIER et al. em 1999 e a inexistência destas na região Amazônica.

Figura 4.15 - Estudo da emissão de SF_6 no mundo. Os pontos em branco apontam os locais com emissão do gás. O circulo em vermelho destaca a inexistência de contribuição de SF_6 nos locais de influencia na amostragem.



Fonte: (OLIVIER et al., 1999).

As razões de mistura determinadas nos perfis verticais são então relacionadas com as duas Estações de Monitoramento Global localizadas no Oceano Atlântico Sul (Ilha de Ascension - ASC) e Norte (Ilha de Barbados - RPB) (Figura 4.1) e assim, é determinada uma fração que correlaciona a contribuição de ASC e RBA, contendo parcelas de influência dos Hemisférios Norte e Sul. Após a determinação da fração, é realizado cálculo do BKG utilizando as razões de mistura determinadas nas Estações Globais do gás de interesse (MILLER et al., 2007; GATTI et al., 2010; GATTI et al., 2014). As fórmulas utilizadas para o cálculo do BKG podem ser observadas a seguir onde a Equação 4.4 demonstra o cálculo das frações e a Equação 4.5 demonstra a determinação do BKG.

$$ASC_{loca} = 1 - RPB_{local} = \frac{SF_{6local} - SF_{6RPB}}{SF_{6ASC} - SF_{6RPB}} \tag{4.4}$$

$$X_{BKG} = ASC_{loca} \times X_{ASC} + RPB_{local} \times X_{RPB} \tag{4.5}$$

Onde ASC_{loca} e RPB_{loca} são as frações correspondentes as Estações Globais ASC e RPB, respectivamente. SF_{6local}, SF_{6RBA} e SF_{6ASC} representam as razões de mistura de SF_6 nos locais de amostragem, em RBA e em ASC, respectivamente. X_{BKG} é o resultado do BKG calculado e, X_{ASC} e X_{RPB}, as razões de mistura do gás de interesse em cada Estação de Monitoramento Global.

4.3.2 Air Mass Back-trajectories Method (AMBaM)

No intuito de adicionar ferramentas para o cálculo da BKG, foi desenvolvida uma nova metodologia de cálculo baseando-se no modelo descrito por ALDEN et al. em 2016. A origem deste foi principalmente motivada pelo desenvolvimento de um novo método completamente independente das concentrações de SF_6, já que ocorre problemas com determinação acurada de suas concentrações, medidas em partes por trilhão (ppt), e a existência de possíveis emissões deste na Amazônia, por ser um gás amplamente utilizado como um isolante elétrico (GLOOR et al., 2007) e, com a instalação de novas plantas hidrelétricas como a de Belo Monte no rio Xingu e Santo Antônio no rio Madeira, estão sujeitas à utilização e emissão deste gás. Desta forma, inviabilizando a utilização do método com o SF_6 como traçador de massas de ar pois requer uma região sem emissões do gás.

Diferentemente do apresentado por Alden, a metodologia desenvolvida utiliza somente o modelo de trajetórias Hysplit model (*Hybrid Single-particle Langragian Integrated Trajectory*). Este modelo foi definido devido ao acesso a seus

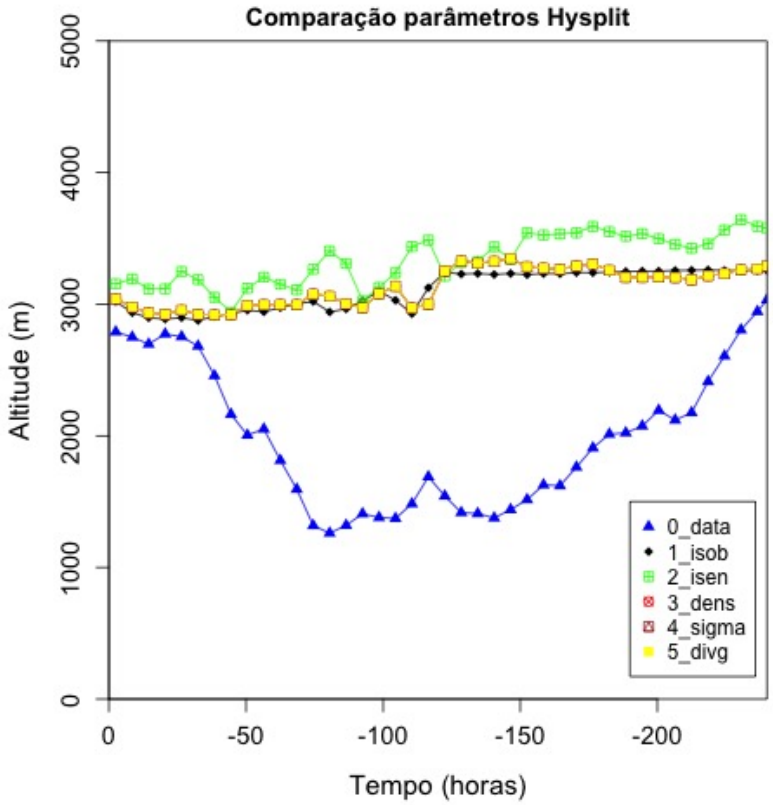
recursos serem de fonte aberta e a prévios trabalhos realizados na comparação da influência gerada no resultado dos fluxos pela variação modelo aplicado. Em GATTI et al. (2014), pode-se ver a comparação dos resultados de fluxo utilizando o tempo de trajetórias obtidos com o modelo Hysplit, com o modelo de inversão Lagrangeano FLEXPART e também com o modelo BRAMS (Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modelling System), desenvolvido no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. A variação obtida no estudo citado no resultado do fluxo de carbono anual é de $\pm$ 0,01 g.C.m^2.dia^{-1} para o local de coleta RBA no ano de 2010.

Para a nova metodologia de cálculo da BKG, foi necessário primeiramente a definição dos parâmetros meteorológicos utilizados pelo modelo. O *Hysplit* conta com seis diferentes combinações de parâmetros (HYSPLIT AIR RESOURCES LABORATORY, 2018):

- data - usa o campo de velocidade vertical no arquivo de dados meteorológicos.
- isob - isobárico, mantém a trajetória em uma superfície de pressão constante.
- isen - isentrópico, mantém a trajetória em superfícies de temperatura potencial constante.
- dens - trajetórias permanecem em superfícies de densidade constante
- sigma - o movimento vertical é zero e a trajetória permanece no mesmo sigma interno
- divg - o movimento vertical é calculado pela integração vertical da divergência de velocidade

Após estudos comparativos entre as diferentes combinações de parâmetros, foi decidido pela utilização da componente vertical denominada de "data"por esta justamente considerar a mistura da coluna vertical sem desconsiderar dados temperatura e pressão. As variações nas altitudes durante o percurso da trajetória é fator importante a ser considerado para validação da utilização desta, já que é necessária a identificação das trajetórias que possuem maiores influências da superfície, ou seja, que estejam próximas à camada limite. Na Figura 4.16 pode-se observar um exemplo de trajetória calculada para o local de amostragem ALF utilizando-se todas as combinações de parâmetros.

Figura 4.16 - Comparação para um perfil das combinações de parâmetros da componente vertical utilizados pelo modelo Hysplit.



Fonte: Produção do autor.

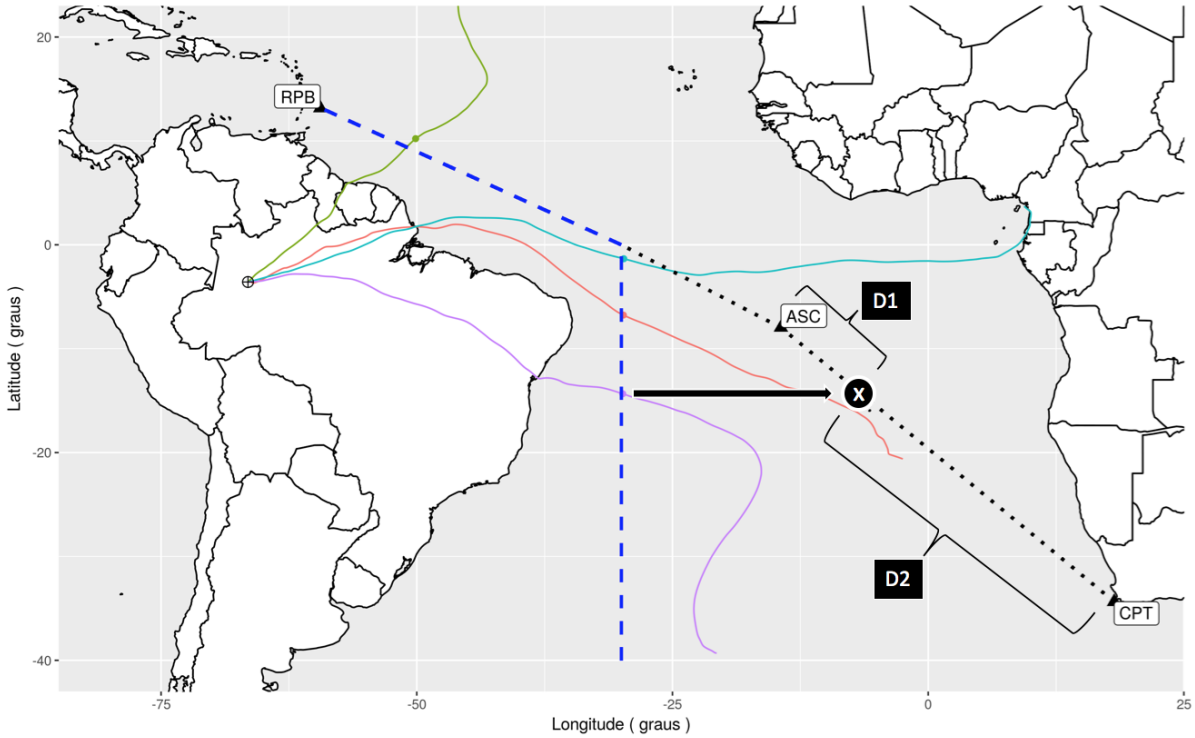
É notável que o parâmetro "data"é o único a apresentar as variações de mistura vertical. Após a definição dos parâmetros foi utilizada a base de dados meteorológicos retroativos, definidos com uma resolução angular de 1º e com início disponível no ano de 2004, para a realização do cálculo das trajetórias incidentes no exato dia de realização da coleta e na exata altitude de cada frasco coletado. Desta forma, as informações dos dados de trajetórias são calculadas com a maior acurácia disponível pelo modelo e com as informações obtidas pelas medições *in-situ*. A base de dados, provida pelo *Air Resourses Laboratory*, pode ser encontrada em: ftp://arlftp.arlhq.noaa.gov/pub/archives/gdas1.

Considerando o fato de que em diversas situações, ao longo das altitudes de um mesmo perfil vertical, as trajetórias de massas de ar possuem origens diferentes, por exemplo um conjunto vindo do hemisfério norte e outro do hemisfério sul, procurou-se desenvolver um método baseado na origem das massas de ar que chegam à costa brasileira. A maior frequência das trajetórias das massas de ar que chegam a Bacia Amazônica ocorre pelo nordeste do país, passando pela linha

entre as estações de RPB e ASC (Figura 4.1), no entanto, em alguns casos, as trajetórias tem sua origem abaixo da latitude de ASC, por esta razão, além destas estações globais, utilizadas no Método que utiliza o SF_6 como traçador de massas de ar, foi adicionado a estação global de Cape Point (CPT).

A posição geográfica de cada trajetória foi utilizada para determinar a razão de mistura do BKG. Na Figura 4.17, é demonstrado um esquema simplificado do método de trajetórias de massas de ar AMBaM.

Figura 4.17 - Exemplificação da nova metodologia do cálculo do BKG com quatro trajetórias de massas de ar oriundas de Tefé, onde: linha azul pontilhada representa o limite virtual imposto; seta e "X"representam a projeção do cruzamento entre as estações globais; D1 e D2 representam a distancia das estações globais e o ponto “x” projetado.



Fonte: Produção do autor.

Foram aplicados dois segmentos denominados de limite virtual (VL), o primeiro é uma linha iniciando a partir da Longitude 40º S e terminando no Equador, no eixo de Longitude 30º O. O segundo segmento é uma linha que conecta o final do primeiro até a estação RPB (linhas azuis tracejadas na Figura 4.17). Na posição a qual a trajetória da massa de ar cruza o VL, é realizada uma projeção até a seção entre um par de Estações de Monitoramento Global, RPB e ASC ou ASC e CPT (“X” na Figura 4.17). Então, pela interpolação da distância entre a projeção e as

estações, é calculada uma fração a ser aplicada na razão de mistura determinada nestas estações, como é demonstrado na Equação 4.6.

$$BKG = C_{EG1} + \left[\left(\frac{D1}{D1 + D2}\right) \times \left(C_{EG1} - C_{EG2}\right)\right] \tag{4.6}$$

Onde C_{EG1} é a razão de mistura do gás na Estação Global superior, D1 e D2 correspondem à distância do ponto de cálculo da BKG ("X" na Figura 4.17) em relação à Estação Global superior e inferior respectivamente e C_{EG2} é a razão de mistura do gás na Estação Global inferior.

Os cálculos descritos acima foram executados utilizando o software de código aberto R (R Core Team, 2013). R é um ambiente de software de código aberto bem conhecido para computação estatística e linguagem de programação (IHAKA; GENTLEMAN, 1996). O código está disponibilizado como um pacote R online em https://github.com/INPE-LAGEE/cqmaTools.

Este é um estudo que contou com a importante colaboração de Alber Sanches Ipia.

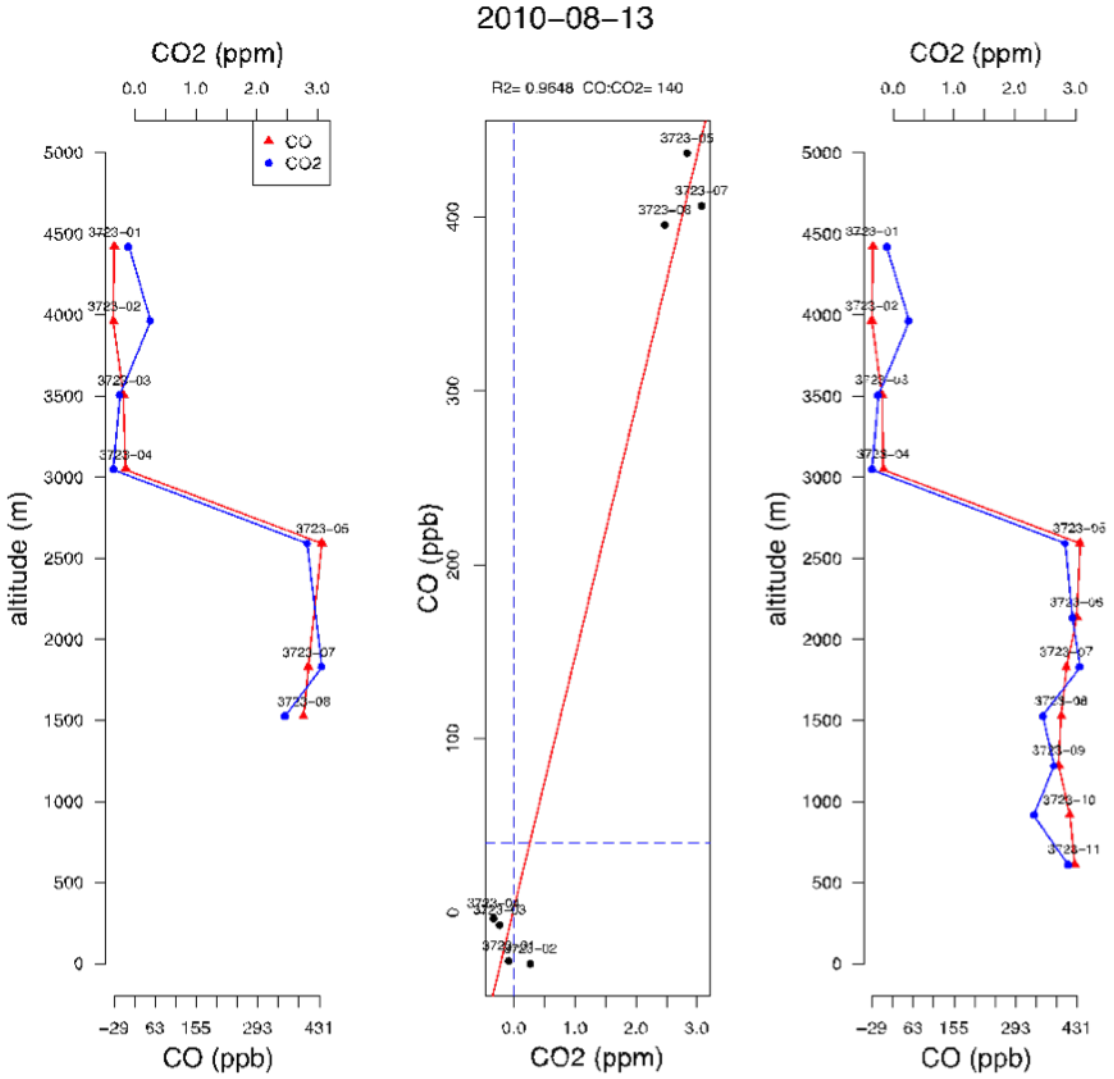
4.4 Uso da Concentração de CO como Traçador de Queima de Biomassa

Para identificar a influência da queima de biomassa e definir o valor da emissão oriunda desta, foi utilizado o CO como traçador de queimadas por meio da razão CO:CO_2 (ANDREAE; MERLET, 2001; CHOU W.W.; SACHSE, 2002; GATTI et al., 2010; ANDREAE et al., 2012; GATTI et al., 2014).

A estimativa da razão CO:CO_2 foi baseada na observação dos perfis que apresentaram clara correlação de crescimento das concentrações, tanto em CO quanto em CO_2, em altitudes acima da camada limite presente nos horários dos voos que, em média, se encontra a uma altitude de 1500 metros, afim de retirarmos a influência da superfície da floresta já que, apesar de ser esta a região na qual as emissões de CO ocorrem em maior escala, também ocorre o processo de absorção de CO_2 com maior intensidade, o que nos levaria a uma presunção errônea no cálculo da razão CO:CO_2. Após esta classificação, foram selecionados os perfis que apresentaram um crescimento mínimo de 100 ppb para o CO e acima de zero para CO_2 em relação a BKG, desta forma são separadas e caracterizadas as plumas de queimada. Como o valor médio da BKG varia em torno de 80 a 100 ppb, foi utilizado como critério de presença de queimada um aumento de cerca de 100% na concentração.

Após a seleção dos perfis e separação dos pontos nos quais foram identificados a pluma de queimada, foi realizado o cálculo da equação da reta apresentada pelas concentrações de CO e CO_2 cujo coeficiente angular representa a razão entre os gases. Para a seleção dos perfis com pluma foram considerados somente os perfis nos quais o coeficiente de correlação (R^2) apresentou resultados maiores que 0.60 (GATTI et al., 2014). Na Figura 4.18 pode-se observar um exemplo de como os perfis foram analisados.

Figura 4.18 - Exemplo de perfil utilizado no cálculo da razão CO:CO_2 em ALF no dia 13 de agosto de 2010. À direita é mostrado o perfil completo, à esquerda o perfil após as análises de crescimento entre CO e CO_2 e, no meio, os pontos das concentrações de CO em função do CO_2 determinando a razão entre os mesmos, também observa-se as linhas limites (pontilhadas em azul) de 40 ppb CO e zero ppm CO_2



Fonte: Produção do autor.

A partir da determinação das razões CO:CO_2, torna-se possível a segregação do Fluxo total de Carbono em dois segmentos, o fluxo proveniente das emissões de queima de biomassa (F_{Fogo}) e o fluxo chamado de non fire, o qual se refere às emissões de origens distintas à queima de biomassa. Apesar de observações relatarem que as emissões naturais de CO na Bacia Amazônica representarem cerca de 10% das concentrações de BKG e, principalmente na estação seca, não performam grande influência nas emissões de CO (ANDREAE et al., 2012), para o cálculo apropriando das emissões provenientes da queima de biomassa, deve-se considerar a existência de outras fontes de emissão de CO que não a queima de biomassa.

Experimentos realizados em laboratório demonstraram que pode ocorrer uma contribuição na emissão de CO próximo ao solo pela oxidação de Compostos Orgânicos Voláteis (VOC) emitidos pelo processo metabólico da floresta por meio da decomposição de matéria orgânica em plantas e no solo (KIRCHHOFF, H. and MARINHO, A., 1990), principalmente em função da degradação térmica e fotoquímica da matéria orgânica (CONRAD, R. and SEILER, W., 1985; SCHADE, G. W. and CRUTZEN, P. J, 1999). A emissão de isopreno proveniente das árvores (KUHN et al., 2007) e emissões diretas de CO pelas mesmas também são possíveis fontes (CONRAD, R. and SEILER, W., 1985; TARR et al., 1995), além da oxidação do CH_4 que é presente na atmosfera global de forma relativamente homogênea (ANDREAE et al., 2012). Portanto, para calcularmos as emissões ”naturais” de CO, a partir dos resultados de fluxo de CO, foi considerado o período sem influência de queimada como emissão natural. Este valor foi subtraído por todo o ano, para evitar ser computada a emissão natural como sendo de queimada. Foi utilizada então a Equação 4.7 para o cálculo do fluxo de emissão proveniente da queima de biomassa (F_{Fogo}) (GATTI et al., 2010; GATTI et al., 2014).

$$F_{Fogo} = \left[\frac{\frac{F_{CO} - F_{CONatural}}{M_{CO}}}{r_{CO:CO_2}} \right] \times M_c \tag{4.7}$$

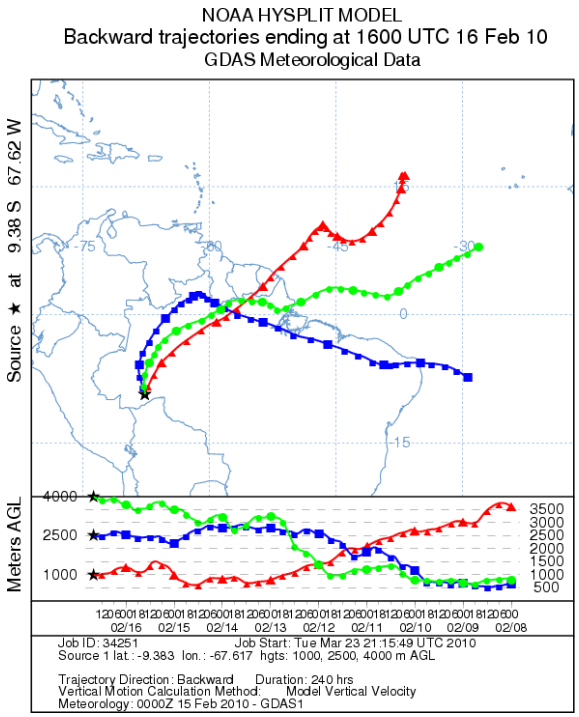
Onde F_{Fogo} é o fluxo de carbono oriundo de queima de biomassa; F_{CO} é o fluxo de CO; $F_{CONatural}$ é o fluxo natural de CO durante a estação chuvosa; $r_{CO:CO_2}$ é a razão CO:CO_2; M_c é a massa molar do carbono e M_{CO} a massa molar do monóxido de carbono.

4.5 Cálculo das áreas de influência

Um dos objetivos deste projeto é a identificação das variáveis climáticas na Bacia Amazônica. No entanto, sabemos que se trata de uma vasta área e, para cumprir o objetivo proposto, foi identificada a necessidade de primeiramente delimitar a área a qual propõe maiores influências no resultado obtido nos perfis verticais, do que somente analisar a Bacia Amazônia como um todo. Assim foi realizada outra importante contribuição deste trabalho, que foi o desenvolvimento de metodologia para a determinação das áreas de influência para cada local de amostragem, que nos permite analisar as regiões nas quais realmente apresentaram algum tipo de influência nos resultados das concentrações dos gases estudados, utilizando as trajetórias de massas de ar obtidas para cada frasco coletado em cada perfil realizado durante um ano.

As trajetórias realizadas pelo modelo *Hysplit* são calculadas por pontos localizados espacialmente a cada hora durante 14 dias retrocedentes ao dia e hora da coleta. A cada hora é calculada a posição das massas de ar referentes à sua origem assim, uma trajetória possui cerca de 336 pontos para sua formação. Na Figura 4.19 vê-se um exemplo do cálculo de três trajetórias retrocedente pelo modelo *Hysplit*.

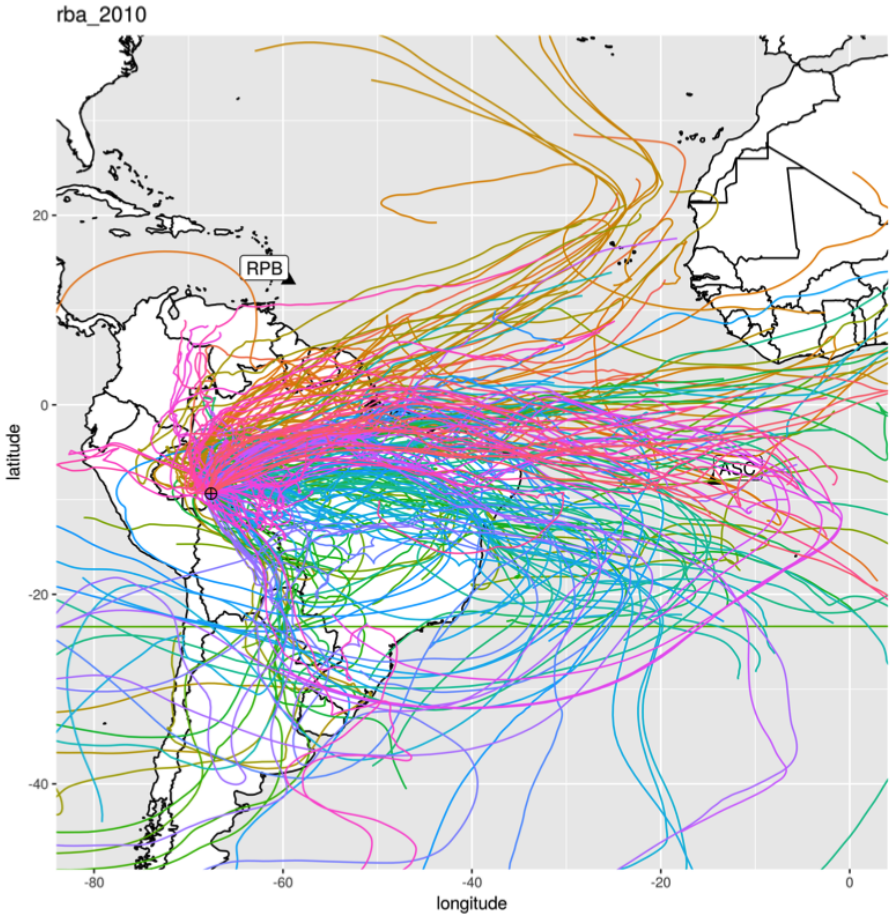
Figura 4.19 - Exemplo de trajetórias calculada pelo modelo *Hysplit* com os pontos realizados a cada 1/4 de hora.



Fonte: (HYSPLIT AIR RESOURCES LABORATORY, 2018).

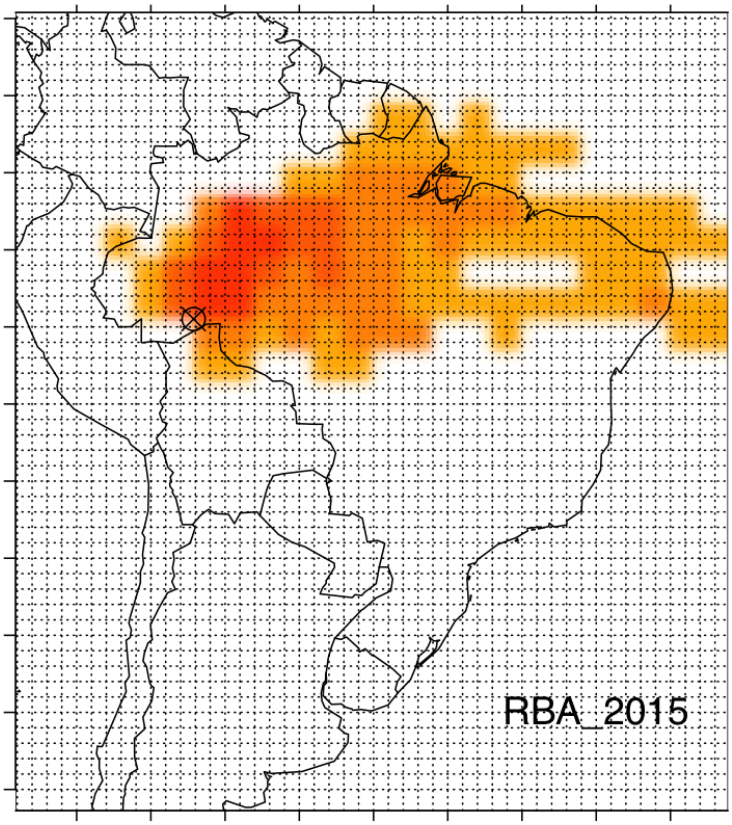
Utilizando as trajetórias calculadas em um período, como na Figura 4.20, na qual observa-se as trajetórias calculadas para o ano de 2010 para cada frasco coletado em RBA, e, ao dividirmos o mapa da América do Sul em grades (Figura 4.21), tornou-se possível realizar não somente uma distribuição espacial da densidade das trajetórias retrocedentes em um determinado período, mas também nos permitiu realizar a contagem do número de pontos contidos em cada grade utilizando a função "*raster*" do programa R, gerando um resultado semelhante a um "*heat map*".

Figura 4.20 - Trajetórias retrocedentes calculadas para todos os frascos coletados em RBA no ano de 2010.



Fonte: Produção do autor.

Figura 4.21 - Divisão do mapa da América do Sul em grades de 1º x 1º em simulação à área de influência em 2015 para RBA.



Fonte: Produção do autor.

Outro importante fator discutido em apresentações sobre o desenvolvimento desta metodologia, foi em relação à sensibilidade do método. Por se tratar de uma resolução bi-dimensional, foi necessária a adição de filtro no qual considerasse as variações da vertente vertical das trajetórias (altitude), para que a área delimitada representasse melhor a influência da superfície. Desta forma foram retiradas do processo de contabilização das áreas, pontos de trajetórias os quais apresentassem altitudes maiores do que 3500 metros assim, consideram-se somente as regiões as quais a superfície tenha maiores possibilidades de interação ou influência nos resultados atmosféricos, removendo portanto, regiões de trajetórias muito acima da camada limite.

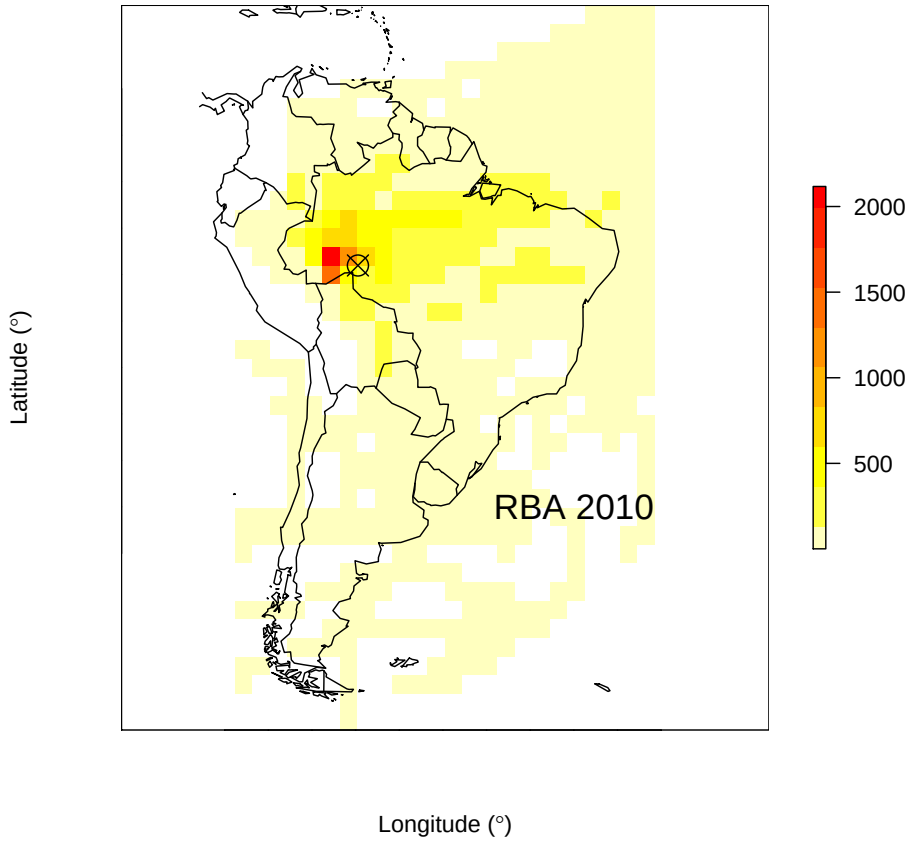
Na Figura 4.22 pode-se observar o resultado da aplicação da metodologia para RBA no ano de 2010 em escala de cores. Quão maior a intensidade da cor vermelha, maior a possibilidade de influência nos resultados obtidos nos perfis de avião. Considerando-se esta premissa e os valores obtidos na escala, foi possível identificar os ”pesos” gerados por cada região, ou seja, sabe-se que apenas uma trajetória incidente ao sul do continente, não gera impactos suficientes na resultante

em período de estudo quando comparada à regiões pelas quais maiores números de trajetórias incidiram, ainda assim, esta única trajetória pode ter gerado algum tipo de impacto, no entanto, amenizado quando aplicado a correção pela sua contribuição relativa ao total de trajetórias, sendo assim, decidiu-se pela aplicação do cálculo do ”peso” das regiões e estes aplicados aos estudos de fluxo, precipitação, focos de queimada, temperatura, entre outros. Na Equação 4.8, observa-se como calcula-se o ”peso” para cada grade incidentes em determinada área de influência.

$$P_{AIi} = \frac{Np_i}{\sum p_{AI}} \tag{4.8}$$

Onde P_{AIi} é o ”peso” calculado para cada grade, Np_i o número de pontos incidentes na mesma grade de cálculo e $\sum p_{AI}$ é a somatória do número de pontos de trajetórias que formam a área de influência.

Figura 4.22 - Resultado da distribuição das grades juntamente com as trajetórias retrocedentes das massas de ar em RBA no ano de 2010 destacando a escala de sensibilidade por número de pontos de trajetórias inseridos nas grades.



Fonte: Produção do autor.

4.6 Precipitação e Temperatura

Para os cálculos de precipitação e temperatura foram adotadas duas metodologias. A primeira utilizando-se a base de dados proveniente do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e, a segunda, utilizando a base de dados globais atmosféricos ERA-Interim, explanados à seguir.

4.6.1 Base de dados INMET

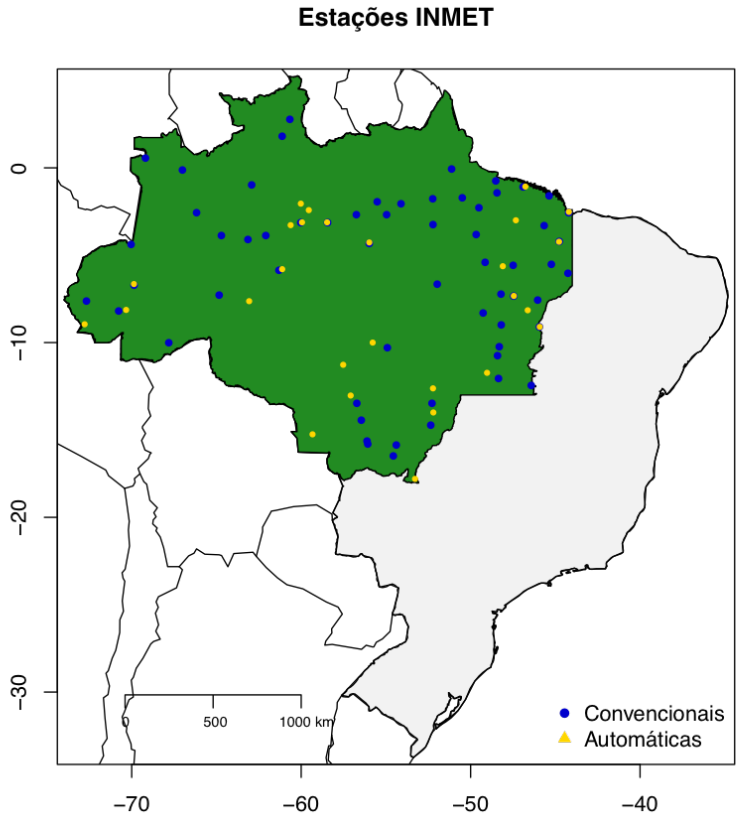
Cedidos pelo INMET, foram utilizados os dados da rede de estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) presentes na região da Amazônia Legal. Esta rede é composta por estações meteorológicas convencionais, com operação inicial no ano de 1961 na área de interesse, e estações meteorológicas de superfície automáticas com início em 2004.

As estações meteorológicas de superfície automáticas são compostas de uma unidade de memória central ("*data logger*"), ligada a vários sensores dos parâmetros meteorológicos (pressão atmosférica, temperatura e umidade relativa do ar, precipitação, radiação solar, direção e velocidade do vento, etc), que integra os valores observados minuto a minuto e os disponibiliza automaticamente a cada hora (INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET (A), 2017). Já as estações meteorológicas convencionais são compostas por sensores isolados que registram continuamente os parâmetros meteorológicos (pressão atmosférica, temperatura e umidade relativa do ar, precipitação, radiação solar, direção e velocidade do vento, etc), que são lidos e anotados por um observador a cada intervalo determinados (INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET (B), 2017). Na Figura 4.23 pode-se observar a distribuição das estações climatológicas presentes na Amazônia Legal no ano de 2015.

Os dados foram enviados após contato com o Instituto em um CD que continha mais de 1000 planilhas do programa Excel divididos em diversas abas com dados horários de cada estação, que claramente não foram desenvolvidas para que fossem aplicadas em outro *software* que não o próprio Excel. No entanto, para que fosse realizada a análise em escala temporal de uma base de dados tão grande, foi desenvolvido uma forma para que os dados fossem convertidos e aplicados no programa R.

Após a compilação dos dados estes foram submetidos à filtros de validação. Para que um dado de uma estação meteorológica de precipitação fosse considerado válido, a mesma deveria apresentar uma constância de medidas de ao menos 20 dias no mês e com medidas válidas durante os 12 meses do ano. Desta

Figura 4.23 - Estações da rede meteorológica INMET Convencionais (bolas em azul) e Automáticas (triângulos em amarelo) disponíveis para o ano de 2015.

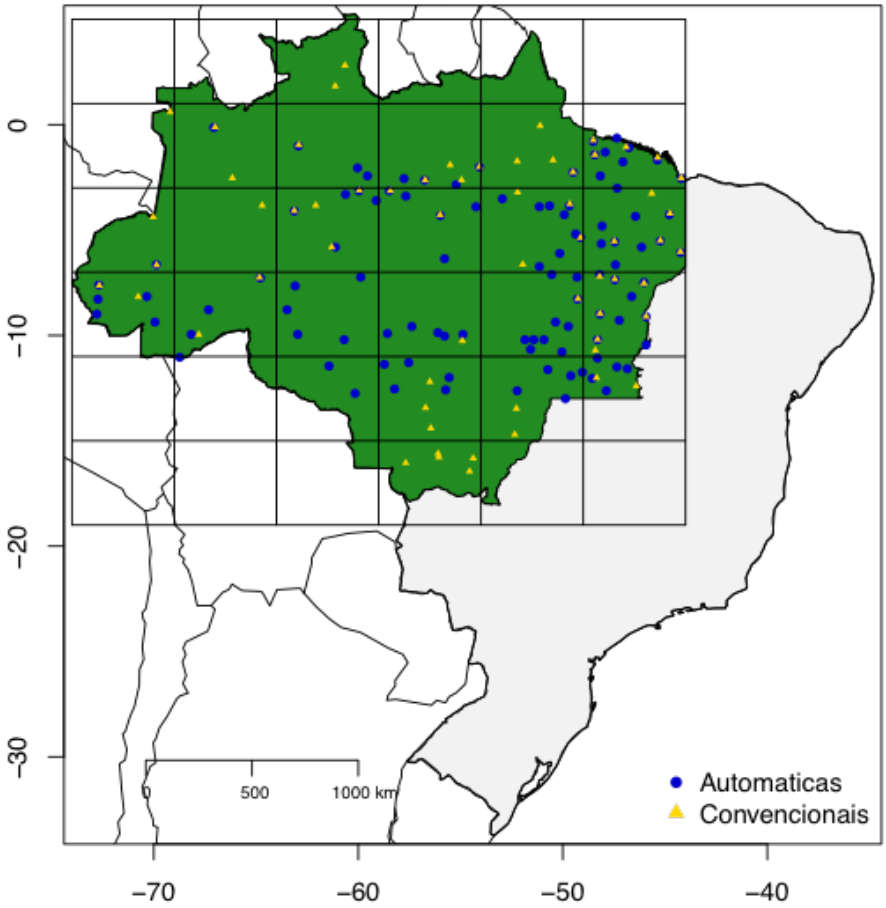


Fonte: Produção do autor.

forma foi realizada a soma mensal dos resultados por estação e depois a soma anual para a resultante final. Já para temperatura, por se tratar de uma variável que sofre menores oscilações, foi considerada a necessidade de medidas em ao menos 15 dias no mês e durante 10 meses ao ano e, por fim, realizada a média anual por estação.

Outro importante fator aplicado no desenvolvimento desta metodologia, como vê-se na Figura 4.23, a distribuição espacial das estações não é homogênea, desta forma, para evitar que regiões com maior densidade de estações representassem maior peso nas médias dos parâmetros meteorológicos, foram determinadas grades 4º x 5º e calculadas primeiramente as médias de cada quadrado e posteriormente a média para toda a região da Bacia, tanto para a variável precipitação, quanto para temperatura. Na Figura 4.24 pode-se observar um exemplo da confecção das grades e as estações automáticas e convencionais contidas nas mesmas no ano de 2014.

Figura 4.24 - Distribuição das estações meteorológicas automáticas (pontos em azul) e convencionais (triângulos em amarelo) mantidas pelo INMET e também o esquema de distribuição das grades na Amazônia Legal.



Fonte: Produção do autor.

4.6.2 ERA-Interim

ERA-Interim é a última reanálise atmosférica global produzida pelo *Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF). O ERA-Interim abrange o período a partir de 1 de Janeiro de 1989 e continua a ser prorrogado em tempo quase real. Os produtos de dados em grade incluem uma grande variedade de parâmetros de superfície de 3 horas, descrevendo as condições meteorológicas, bem como as condições do oceano e da superfície terrestre (DEE et al., 2011). Foram utilizados os dados de precipitação e temperatura disponibilizados pelo ERA-Interim e, como são produzidos em grades com escala de 1°x1°, os resultados foram distribuídos pela região de interesse e aplicada a sensibilidade (pesos) realizados pelo cálculo das áreas de influência, conforme descrito no sub-capítulo 4.5.

4.7 Análise estatística

Para auxiliar na discussão dos fatores que influenciam a média mensal de fluxo CO, utilizando-se das AI anuais para cada local de amostragem e aplicando-se à metodologia de pesos (vide 4.8) distribuídas nestas áreas nos resultados mensais da média ponderada de temperatura e soma mensal de precipitação à partir dos dados da base global ERA-Interim, da soma dos resultados GRACE e da soma do número de focos de queimada, foi utilizado o programa estatístico STATPLUS® e analisadas as correlações entre o fluxo de CO e variáveis meteorológicas.

Para as correlações estatísticas foram analisados três parâmetros:

1) Coeficiente de correlação ou coeficiente de correlação de Pearson linear (R), que sugere a intensidade e a direção (positiva ou negativa) de uma relação linear entre duas variáveis. Apesar de valores arbitrários, correlações inferiores à 0,6 são consideradas fracas, de 0,6 a 0,79 consideradas fortes e, acima de 0,8, consideradas muito fortes. Todavia o coeficiente de Pearson é capaz de traduzir qual a contribuição de uma variável ao comportamento da outra (SCHOBER; SCHWARTE, 2018).

2) R^2 ajustado que é uma modificação do coeficiente de correlação (R^2). Enquanto R^2 aumenta quando variáveis randômicas são adicionadas ao modelo de regressão linear, o R^2 ajustado aumenta apenas se o termo adicionado for relevante. Pode ser útil para comparar os modelos com diferentes números preditores (NETER et al., 2005). Desta forma, pelo número de dados disponíveis para a análise e, para que fossem encontrados resultados robustos evitando que dados não coerentes à regressão linear, mesmo que aumentando a correlação, fossem eliminados, decidiu-se pela utilização do R^2 ajustado.

3) *p-value* é utilizado para testar a hipótese nula quando *p-value* que, neste caso, ocorre quando as variáveis não pertencem estatisticamente ao mesmo grupo. O inverso ocorre quando o valor de *p-value* for menor do que 0,05 (< 0,05), permitindo rejeitar a hipótese nula significando que a variável melhora significativamente o ajuste do modelo, e pertencendo estaticamente ao mesmo grupo (NETER et al., 2005).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

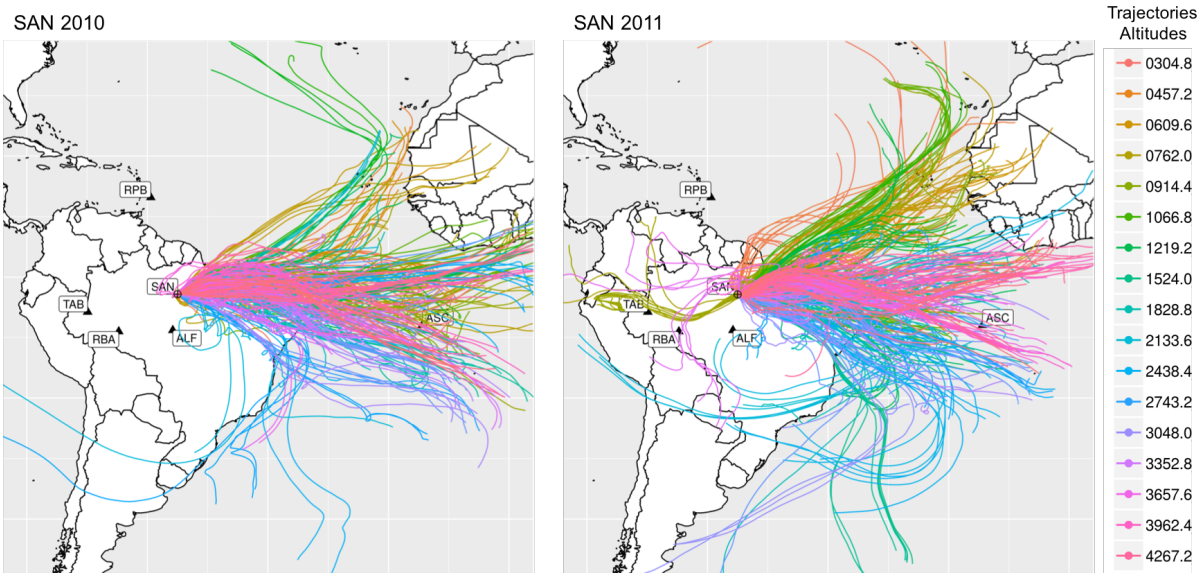
5.1 Desenvolvimento de metodologia - AMBaM

A metodologia aplicada para o cálculo de BKG possui alta capacidade na influência nos fluxos de GEE determinados pelo Método de Integração de Coluna na Amazônia. Para adicionar ferramentas para o cálculo de BKG, foi desenvolvido um novo método completamente independente de um traçador de massa de ar como o SF_6 utilizando os dados de 2010 e 2011 para a comparação com os resultados disponíveis em GATTI et al., 2014. O uso do modelo de transporte HYSPLIT foi a opção escolhida. GATTI et al., 2014 testou a influência na estimação dos fluxos da Bacia Amazônica de três diferentes modelos de transporte no cálculo do tempo de deslocamento das massas de ar, HYSPLIT, (Flexible Particle dispersion model) e BRAMS (Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modelling System) e concluiu-se que o primeiro é uma opção confiável.

A região estudada possui um padrão de circulação atmosférico cujo o ar que entra na Bacia Amazônica é dominado pelos ventos alísios que partem do Oceano Atlântico tropical (MILLER et al., 2007) em direção aos Andes (oeste). Este comportamento particular permite relacionar o BKG do gás desejado utilizando as concentrações dos mesmos, determinadas nas estações globais da NOAA ASC e RPB, justamente pelo posicionamento destas estações (GERBIG et al., 2003; GATTI et al., 2010). Além disso, para melhor representar as massas de ar de origem abaixo da Longitude de ASC, foi adicionada a estação Cape Point (CPT, 34,3º S, 18,4º E). Outro importante aspecto a ser observado é a Zona de Convergência Intertropical (ITCZ) que sofre grandes mudanças sazonais na Bacia Amazônica. Durante o verão esta se move para o norte boreal, de tal modo que em julho quase toda a Bacia fica ao sul da ITCZ e, portanto, encontra-se no Hemisfério Sul tanto meteorológica quanto geograficamente. Em contraste, durante o verão austral, a ITCZ pode mover-se para o sul até os 20º S, de modo que uma grande parte da Bacia está no Hemisfério Meteorológico Norte. Essa mudança tem importantes consequências tanto para o clima predominante quanto para a composição atmosférica na região de estudo (ANDREAE et al., 2012). A Figura 5.1 mostra as trajetórias retrocedentes de cada amostra de cada perfil para o local de amostragem SAN, calculadas com quatorze dias para os anos de 2010 e 2011. Observa-se um comportamento padrão das massas de ar e nota-se que um grande número de trajetórias possuem origem em latitudes mais baixas que ASC. Geralmente regiões ao sul apresentam menores concentrações atmosféricas de GEE, desta forma, para melhor representar essas trajetórias e, por consequência, estas regiões, os resultados da estação de Cape Point (CPT, 34,3º S, 18,4º E) foram adicionados ao método AMBaM. Esta adição

representa uma melhora em comparação com o antigo método baseado em SF_6, que não detinha capacidade de adicionar informações de regiões abaixo de ASC, sendo estas igualadas às concentrações obtidas em ASC por artifício matemático conforme a 4.5. Isso poderia representar uma superestimação do BKG e, como consequência, uma subestimação do fluxo da Amazônia.

Figura 5.1 - Exemplo de trajetórias retrocedentes calculadas para cada amostra realizada nos anos de 2010 e 2011 no local de amostragem SAN.



Fonte: Produção do autor.

Baseado em ALDEN et al. 2016 que calculou o BKG e os fluxos de CO_2 sobre a Bacia Amazônica aplicando o modelo de transporte Lagrangeano FLEXPART, artigo o qual utilizou o limite de -30º de Longitude como o domínio de fronteira de inversão regional, onde o BKG de CO_2 foi estimado, o mesmo limite foi aplicado no AMBaM como o limite virtual (VL). Obviamente, o melhor cenário para determinar o ponto de cruzamento seriam as linhas que combinam as estações globais em si (linhas pontilhadas pretas na Figura 4.17) mas, abaixo do equador, a maioria das trajetórias retrocedentes, devido a uma limitação do HYSPLIT em um máximo de 14 dias para o cálculo destas, não alcançariam as linhas. A aplicação do VL nos promoveu a solução deste problema e, para compreender também as trajetórias do Hemisfério Norte, a VL foi dividida em dois segmentos conforme descrito na subseção 4.3.2.

Além da determinação do BKG, o mesmo método foi aplicado para o cálculo do tempo no qual a massa de ar percorreu da costa até o local da amostragem, sendo estes aplicados no Método de Integração de Coluna conforme a Equação 4.1.

5.1.1 Validação do método

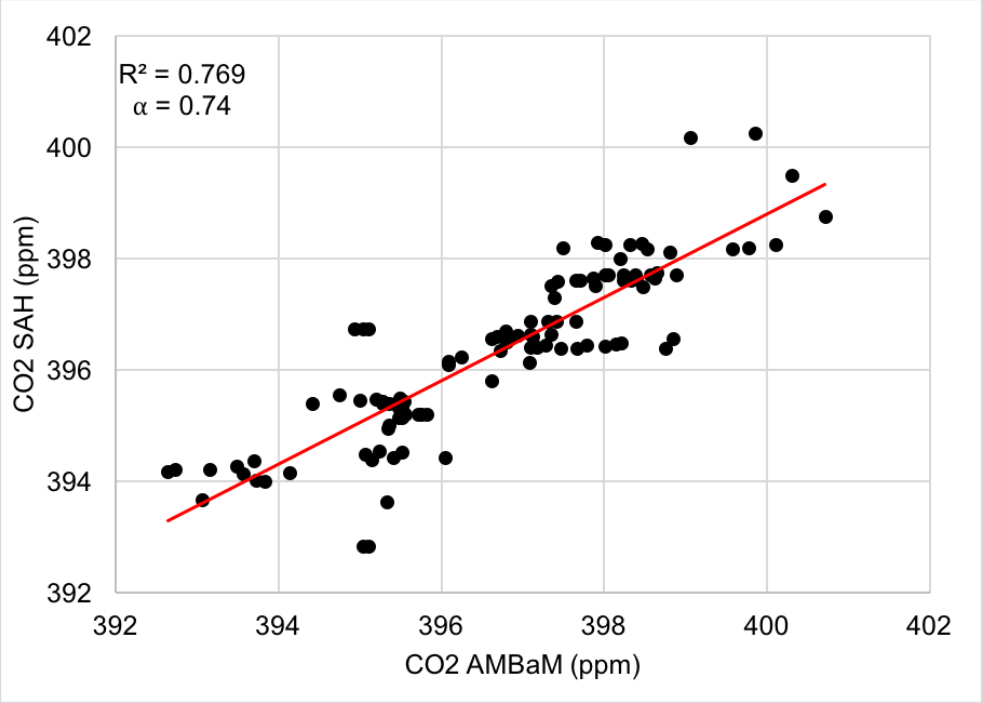
Para validar o método de cálculo do BKG baseado no SF_6, GATTI et al., 2010 utilizou os resultados de CO_2 obtidos em perfis verticais realizados em um local de amostragem presente na região costeira do país denominado Fortaleza. Foi determinada uma correlação entre os resultados obtidos pelo método e as concentrações determinadas nos perfis pelo coeficiente de correlação (R^2) com resultado igual a 0,7.

Seguindo a mesma direção, nos anos de 2013 e 2014, amostragem com perfis verticais foram realizadas no local de amostragem Salinópolis (SAH, 0.76º S, 47.8º E). A metodologia de amostragem seguiu o mesmo procedimento descrito na secção 4.1.1, exceto para as altitudes. Estes perfis foram realizados atingindo o topo de 6,6 km de altura. Testou-se o cálculo do AMBaM utilizando 19 perfis verticais do gás CO_2 realizados em SAH, cujas datas dos perfis utilizados se encontram na Tabela 8.5 no Anexo A. O AMBaM foi aplicado usando as informações destes perfis e os resultados de CO_2 e CO_2 AMBaM foram comparados. Para evitar a influência da superfície, utilizou-se os frascos amostrados acima de 4 km de altitude. Foi encontrado um coeficiente de correlação (R^2) de 0,769 (Figura 5.2), mostrando consistência entre o BKG predito por AMBaM e as análises das concentrações de CO_2 na Costa.

Também foram aplicados dois testes estatísticos, o F-teste e o teste T, para testar duas hipóteses: se as amostras obtidas em SAH pertencem ao mesmo grupo de dados obtidos pelo BKG AMBaM, correspondente à hipótese nula, ou se pertencem a grupos distintos.

Para testar as variâncias, aplicou-se o F teste, mostrando razões de variâncias próximas de 1 para o gás testado e, analisando-se o valor de p foi possível concluir que não houve diferença significativa entre as variâncias dos dois conjuntos de dados. Portanto, o teste T clássico foi utilizado assumindo a igualdade das duas variâncias. Os resultados mostraram um nível de significância maior que 5%, o que nos leva a aceitar a hipótese nula, assim, não é possível afirmar que os dois conjuntos de dados são estatisticamente diferentes, mostrando que, estatisticamente, ambos os dados pertencem ao mesmo conjunto.

Figura 5.2 - Correlação obtida pela comparação dos resultados de CO_2 obtidos no topo de 22 perfis no local de amostragem SAH e os resultados preditos pelo AMBaM.



Fonte: Produção do autor.

5.1.2 Comparação dos resultados do BKG AMBaM e os resultados obtidos pelo método baseado no SF_6

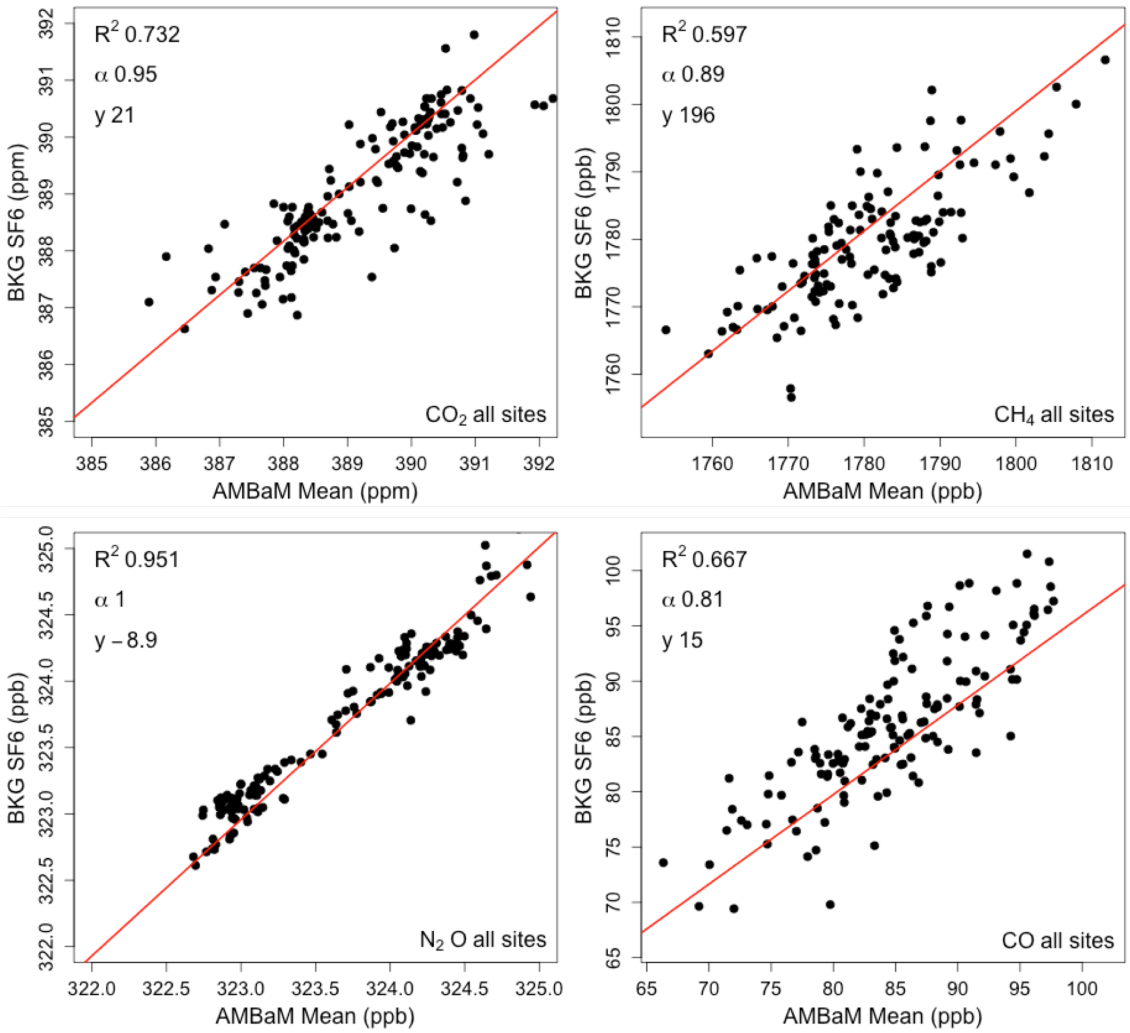
A fim de verificar a confiabilidade do AMBaM, os resultados do BKG foram comparados usando o método baseado em BKG SF_6 aplicado anteriormente no cálculo de fluxo em GATTI et al., 2014. Este método fornece apenas um valor de BKG para o todo perfil, diferentemente do AMBaM, que fornece um valor de BKG para cada amostra do perfil, portanto, para fins de comparabilidade, a média dos valores de AMBaM BKG foram calculados.

Os mesmos testes estatísticos descritos anteriormente foram aplicados para este grupo de dados e os resultados confirmaram a correlação. No F teste não ocorreu diferença significativa entre as variâncias dos dois conjuntos de dados para os gases CO, CH_4, N_2O e CO_2 e, no teste T, os resultados foram superiores ao nível de significância, então é possível assumir que estatisticamente os grupos de dados comparados pertencem à mesma origem.

Na Figura 5.3 apresentam-se as regressões lineares de todos os gases estudados para os dois métodos, com seus respectivos coeficientes de correlação (R^2), o coeficiente angular (α) e a interceptação (y). Todos os resultados do coefi-

ciente angular foram superiores a 0,8, o que reflete uma boa correlação entre os dados. N_2O (R^2 = 0.951, α = 1, y = -8.9) seguido por CO_2 (R^2 = 0.732, α = 0,95, y = 21) os resultados mostraram a melhor concordância entre os gases estudados enquanto CH4 (R^2 = 0,597, α = 0,89, y = 196) e CO (R^2 = 0,667, α = 0,81, y = 15) apresentou uma maior dispersão entre os métodos.

Figura 5.3 - Correlação obtida pela comparação entre as metodologias para os gases CO, CH_4, N_2O e CO_2 e seus respectivos coeficientes.

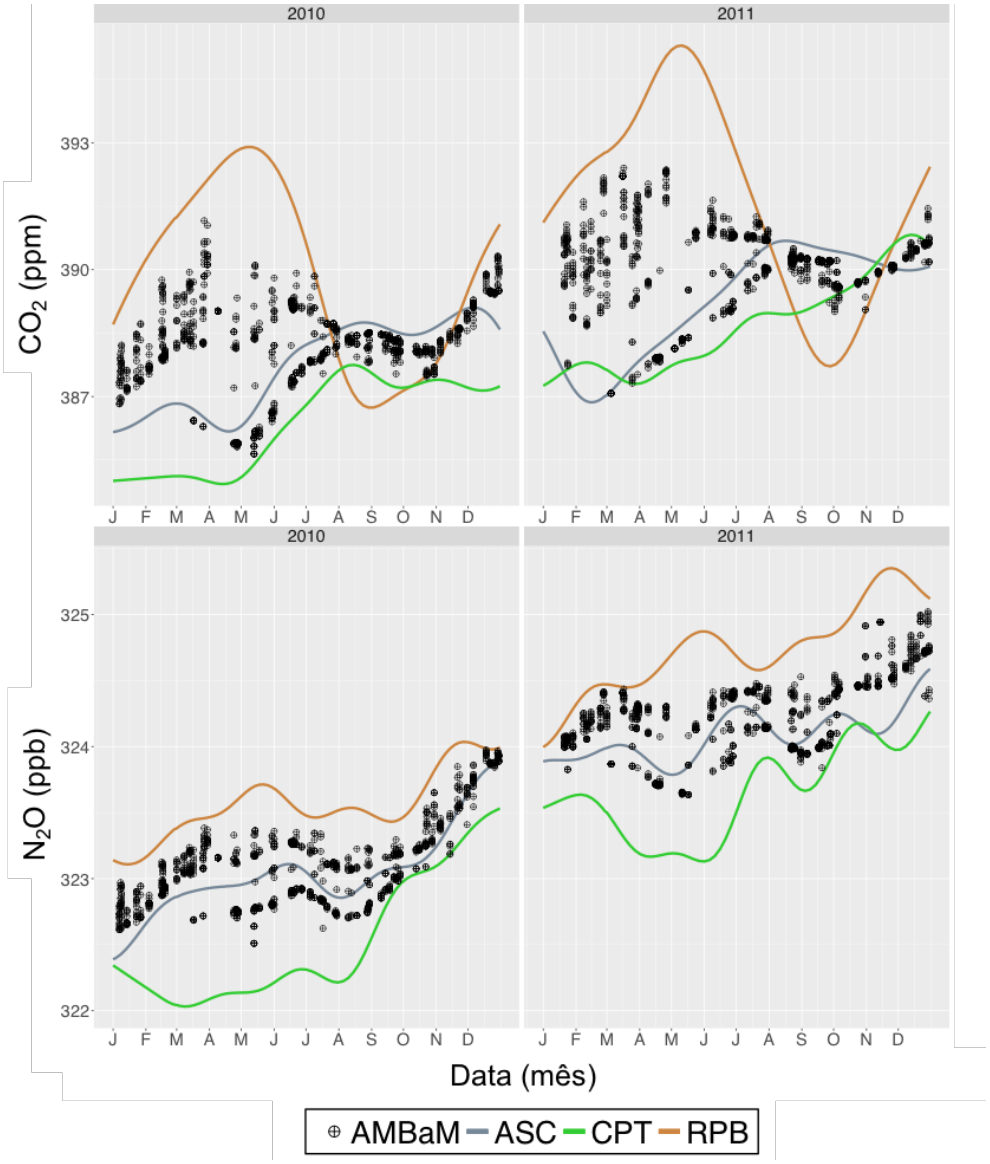


Fonte: Produção do autor.

É importante mencionar que, embora estatisticamente os resultados sejam os comparáveis entre si, diferenças eram esperadas devido a dois fatores importantes. O primeiro fator é a diferença entre o cálculo das metodologias, sendo uma com dados únicos por perfil e outra que gera dados a cada frasco e, a segunda, a própria introdução das medidas de CPT. Nas Figuras 5.4 e 5.5 pode-se observar os resultados do BKG AMBaM obtidos por perfil dos quatro gases analisados no

anos 2010 e 2011. Nesta vê-se também as concentrações na série temporal das estações ASC, RPB e CPT.

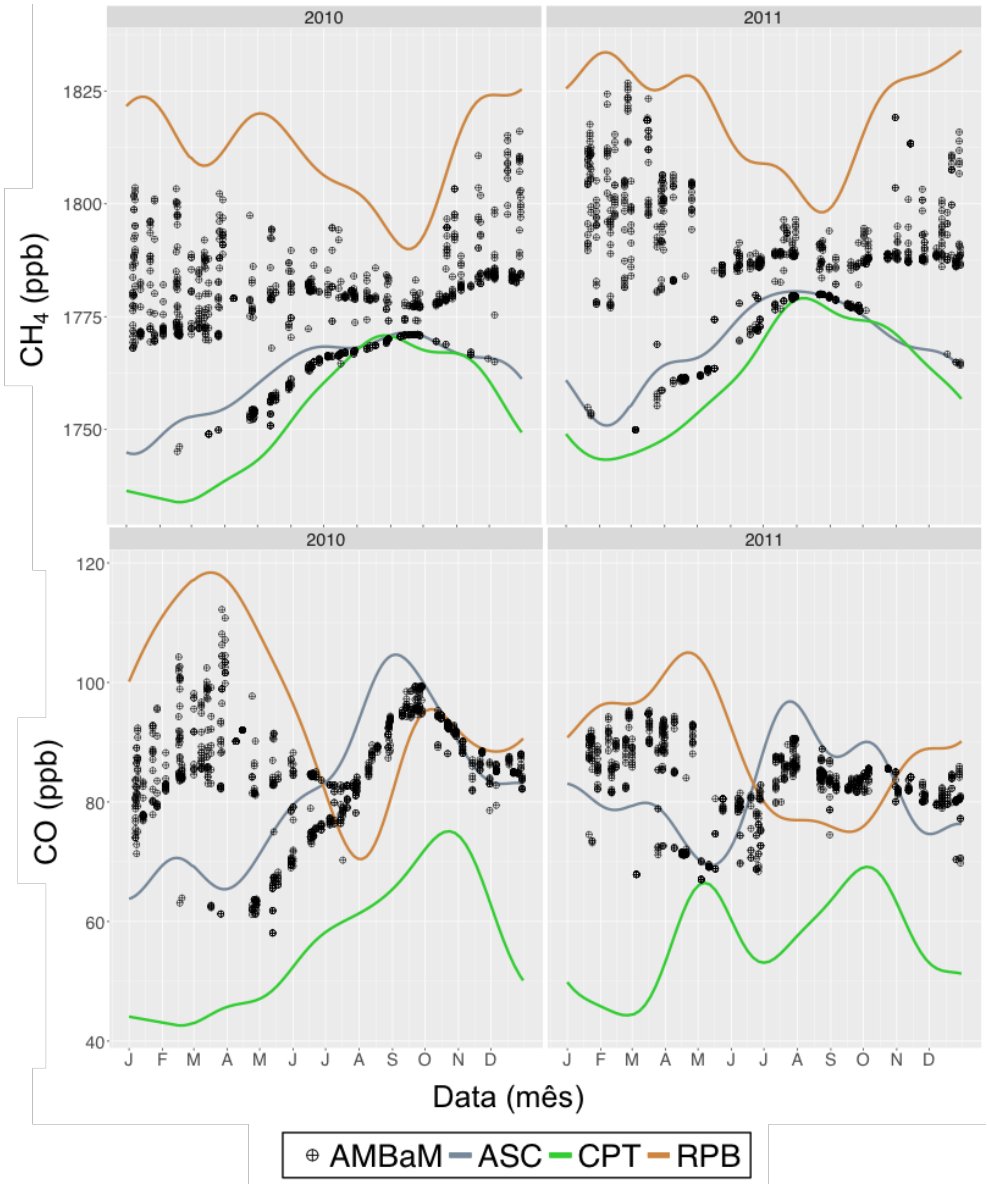
Figura 5.4 - Série temporal dos resultados de perfis de BKG AMBaM para os gases CO_2 e N_2O e as concentrações das estações globais RPB, ASC e CPT.



Fonte: Produção do autor.

Analisando-se o BKG AMBaM usando todo o perfil (Figuras 5.4 e 5.5), é possível identificar a influência das razões de mistura CPT neste método. Isso pode explicar porque os resultados de CH_4 e CO na regressão linear mostraram maiores dispersões (Figura 5.3). Estes gases apresentam as maiores diferenças nas concentrações entre RPB e CPT, o que pode representar uma maior variação no cálculo do BKG em perfil, uma vez que algumas trajetórias retrocedentes apresentaram sua origem mais ao sul do que a latitude de ASC, considerando concentrações dos gases ainda menores, o que causou uma redução na média do BKG

Figura 5.5 - Série temporal dos resultados de perfis de BKG AMBaM para os gases CO e CH_4 e as concentrações das estações globais RPB, ASC e CPT.



Fonte: Produção do autor.

em comparação com o BKG calculado a partir do SF_6. Em contrapartida, quando as concentrações das estações globais apresentam menor variação, a correlação entre os dois métodos é maior porque, apesar de o perfil ainda apresentar diferentes origens de trajetórias retrocedentes de massa de ar, devido a a pequena variação entre as estações globais, a média do AMBaM BKG está mais próxima do BKG pelo método SF6. Outra importante observação é que os resultados do BKG estão sempre contidos entre as concentrações apresentadas pelas estações globais, garantindo portanto, a representação das massas de ar que entram no continente brasileiro.

Nas comparações método a método, verificou-se a compatibilidade entre

os mesmos, no entanto, foi preciso verificar qual seria o real impacto gerado na resultante quando aplicado o BKG AMBaM no Método de Integração de Coluna. Desta forma, com o propósito de verificar justamente a influência do BKG AMBaM na determinação do comportamento da Amazônia pelo cálculo do fluxo de carbono, os resultados por perfil foram aplicados, substituindo os resultados do BKG obtidos a partir do método com SF_6, nos dados utilizados em GATTI et al., 2014. Na Tabela 5.1 mostra-se a comparação dos métodos com os resultados de fluxo total anual por local de amostragem e o fluxo escalonado para a Amazônia. As incertezas do fluxo utilizando o BKG AMBaM são representadas pelo erro absoluto do fluxo por perfil quando comparados diretamente com os resultados obtidos previamente, por perfil, utilizando o traçador de massas de ar SF_6.

Tabela 5.1 - Resultados do cálculo do fluxo utilizando o BKG AMBaM em comparação aos fluxos publicados em GATTI et al., 2014.

Locais	TAB	RBA	SAN	ALF	
	2010 fluxos (gC m^{-2} d^{-1})				2010 fluxo escalonado (Pg C ano^{-1})
	Resultados utlilizando o BKG SF6 (Gatti et al., 2014)				
Total	0.15 ± 0.10	0.17 ± 0.11	0.33 ± 0.50	0.29 ± 0.15	0.48 ± 0.18
	Resultados utilizando o BKG AMBaM				
Total	0.16 ± 0.01	0.12 ± 0.05	0.31 ± 0.02	0.22 ± 0.07	0.40 ± 0.10
	2011 fluxos (gC m^{-2} d^{-1})				2011 fluxo escalonado (Pg C ano^{-1})
	Resultados utlilizando o BKG SF_6 (Gatti *et al*., 2014)				
Total	- 0.01 ± 0.07	- 0.04 ± 0.07	0.46 ± 0.20	0.24 ± 0.06	0.06 ± 0.10
	Resultados utilizando o BKG AMBaM				
Total	- 0.17 ± 0.07	0.00 ± 0.04	0.21 ± 0.25	0.23 ± 0.01	0.00 ± 0.15

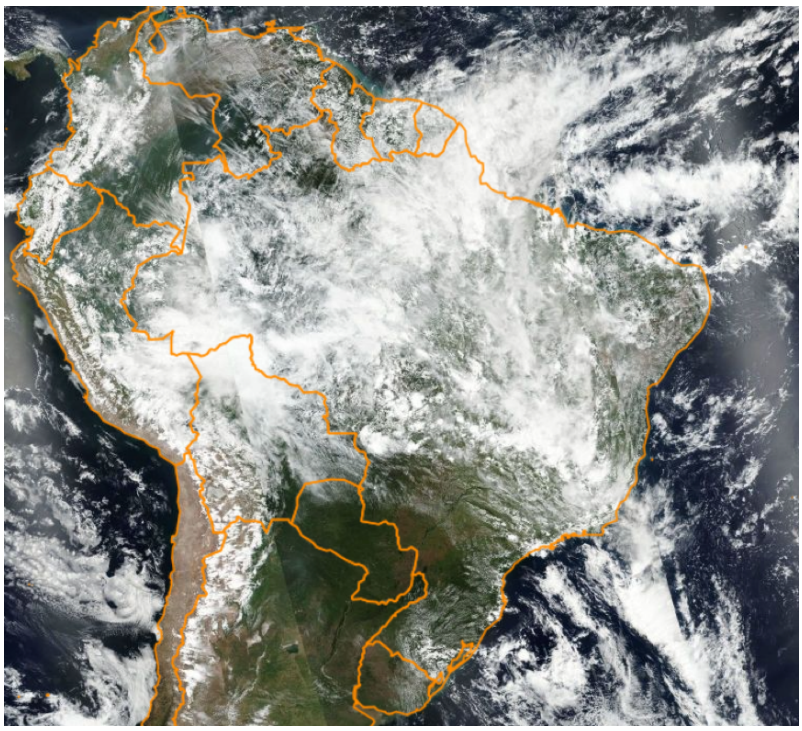
Embora tenham sido observadas diferenças nos fluxos totais determinados por local de amostragem, no fluxo escalonado em ambos os anos, nota-se que não houve modificações no comportamento observado da Amazônia, apresentando resultados comparáveis considerando suas variações, o que nos confere a confiabilidade para substituir o método de cálculo do BKG utilizando o SF_6 como traçador de massas de ar pelo AMBaM. O único local a apresentar uma maior disparidade de resultado foi em SAN no ano de 2011, com um erro absoluto de $\pm$ 0,25. Diversas buscas foram realizadas objetivando o esclarecimento da causa desta diferença, no entanto, não obteve-se resposta para tal discrepância.

O desenvolvimento do método AMBaM é objeto da construção de artigo científico e será submetido para revisão à revistas. Também passou a ser utilizado por todo o grupo de pesquisa sendo doravante aplicado às novas publicações.

5.2 Desenvolvimento de metodologia para precipitação e temperatura

Para o entendimento e verificação dos resultados de emissão da Amazônia, foi decidido como objetivo deste trabalho, o desenvolvimento de metodologia para análise dos dados de precipitação e temperatura, principais variáveis climatológicas que sofrem mudanças com as alterações climáticas e, por sua vez, causam modificações no meio. Em estudos anteriores, a utilização de dados providos por satélites, eram as principais ferramentas na busca do entendimento destas variáveis, principalmente com a ferramenta TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*), com a base de dados GPCP (*Global Precipitation Climatology Project - Monthly Global Precipitation* (CORREIA, 2013; DOMINGUES, 2013; BORGES, 2013; BASSO, 2014) no entanto, sabe-se que a cobertura de nuvens representam um grande obstáculo ao sensoriamento remoto óptico em regiões tropicais úmidas, sendo a análise de probabilidade de cobertura de nuvens um pré-requisito fundamental para os estudos do processo do sistema terrestre nessas regiões (ASNER, 2001), na Figura 5.6 pode-se ver um exemplo da densa cobertura de nuvens incidente no país. Para atingir-se as informações necessárias neste estudo, buscou-se uma base de dados com medidas *in-situ* capaz de prover informações em escala temporal. Com isso, a base de dados provida pelo INMET e, posteriormente, pelo ERA-Interim, foram ferramentas capazes de nos prover tais informações.

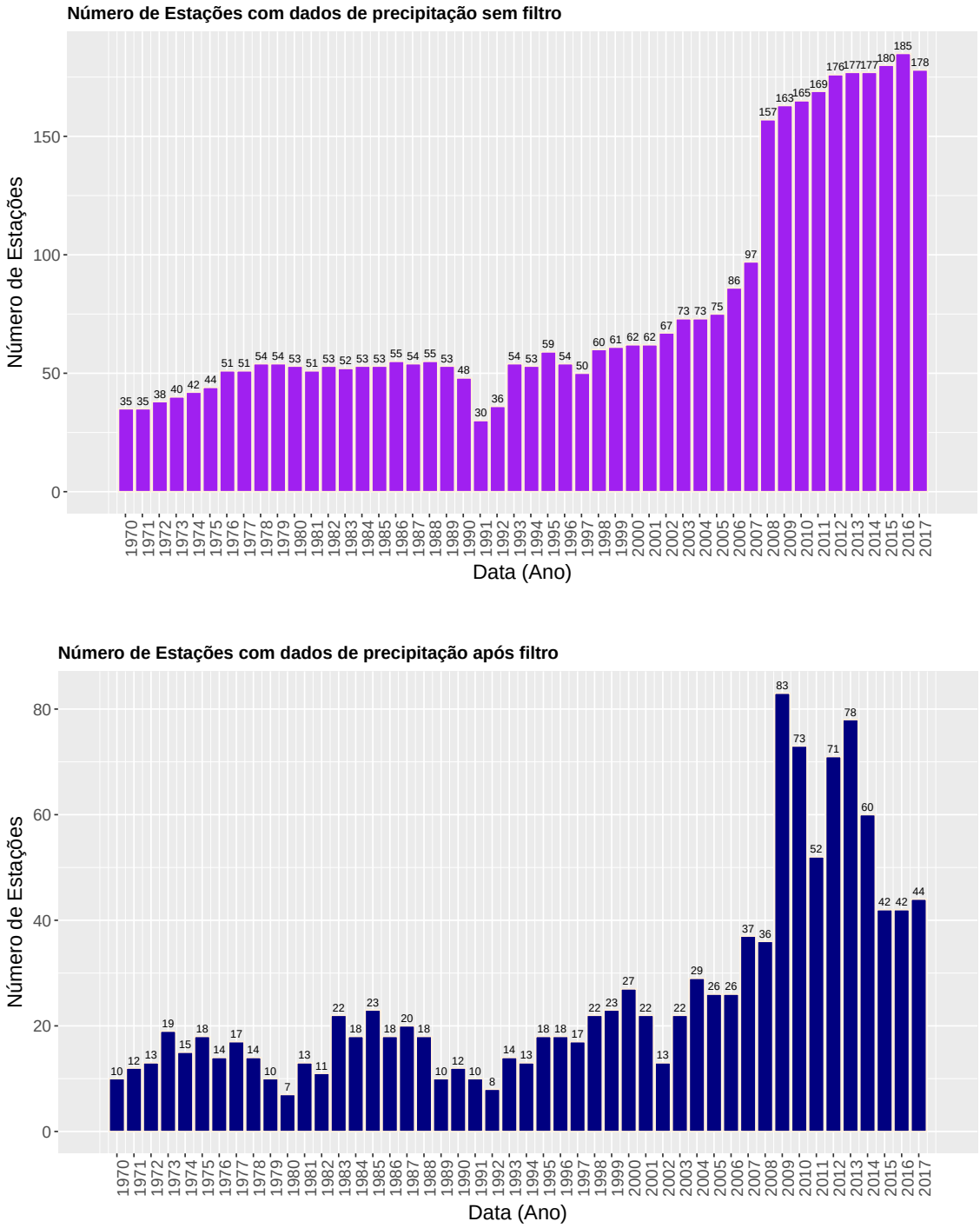
Figura 5.6 - Imagem com evento de densa cobertura de nuvens na região Norte do país no dia 24/03/2013.



Fonte: http://www.inmet.gov.br/satelites/

A respeito da base de dados provida pelo INMET, quando analisados os dados, logo notou-se que, principalmente nas estações Convencionais, por haver a necessidade de uma anotação dos resultados manualmente, haviam diversos dias nos quais esta não foi efetivada, gerando lacunas na base de dados. Estas gerariam graves efeitos principalmente na análise da precipitação pois, para a computação dos dados mensais desta, foi realizada a soma diária mensal e, como um dia na Amazônia pode chover mais de 100 mm em uma região, estes dados faltantes, poderiam causar resultantes errôneos. Para que estes fossem evitados, após estudos de comparação, foi desenvolvido um filtro que, para que uma estação fosse contabilizada na série histórica, ela deveria ter medidas computadas em ao menos vinte dias por mês e durante os 12 meses do ano. Na Figura 5.7 pode-se observar o número de estações inicialmente disponíveis sem a aplicação do filtro e a depleção causada no número destas após a aplicação do mesmo nos dados de precipitação. Quando aplicado o filtro, os dados iniciados em 1950 até 1969 foram descartados por não apresentarem densidade espacial suficiente para a representatividade da Amazônia como um um todo.

Figura 5.7 - Análise do número de estações disponíveis para os dados de Precipitação sem a aplicação do filtro e após a aplicação do mesmo.

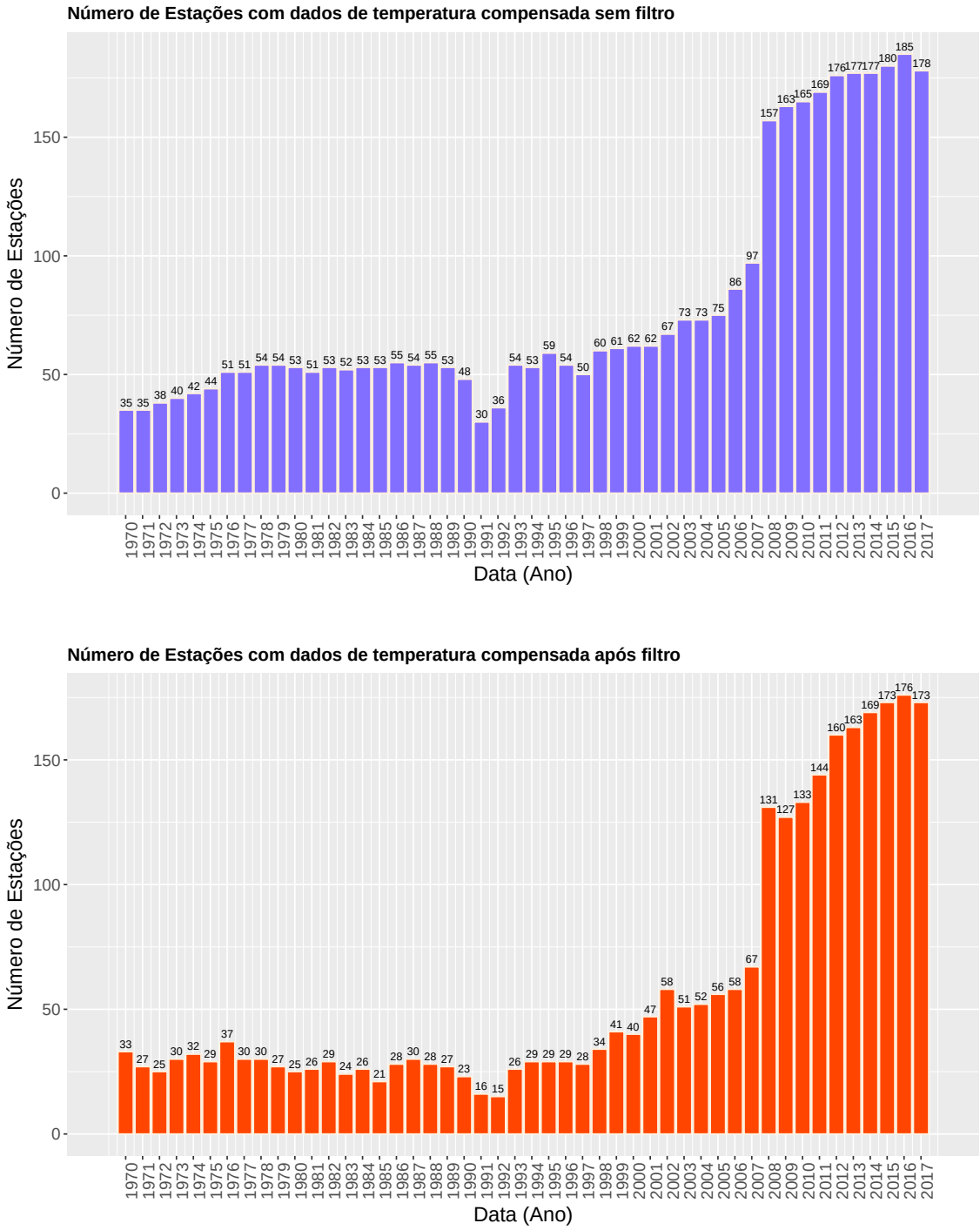


Fonte: Produção do autor.

Como vê-se na Figura 5.7, ocorreu um grande corte de estações por apresentarem dados de representatividade insuficientes, no entanto, as estações restantes geraram dados julgados confiáveis.

Na Figura 5.8 são apresentados também o número de estações disponíveis, desta vez para os dados de temperatura, antes e depois da aplicação do filtro. Como observa-se, ocorreu um corte em um menor número de estações por se tratar de um filtro com menores exigências.

Figura 5.8 - Análise do número de estações disponíveis para os dados de temperatura sem a aplicação do filtro e após a aplicação do mesmo.



Fonte: Produção do autor.

Após a filtragem dos dados e a garantia da confiabilidade nos mesmos, o próximo passo foi o estudo da densidade espacial das estações. Em outras palavras, um estudo sobre a representatividade das mesmas em relação à Amazônia. Nas Figuras 5.9 e 5.10 pode-se observar os mapas com as principais estações disponíveis utilizadas no cálculo da precipitação e suas respectivas localizações na Amazônia Legal. Vê-se que a distribuição das estações não é homogênea o que poderia gerar conclusões errôneas já que grandes regiões da Bacia poderiam não estar representadas ou regiões com maior número de estações poderiam possuir maior peso no cálculo para a Amazônia.

Em uma aproximação gráfica de melhor visualização, na Figura 5.11 observa-se um mapa de densidade longitudinal e latitudinal das mesmas estações. Nesta observa-se que existe uma grande dispersão latitudinal principalmente abaixo da Latitude -9º até o ano de 2007, quando foram instaladas diversas estações Automáticas que aumentaram a cobertura espacial na região da Amazônia Legal. Em relação à distribuição longitudinal, vê-se um espaçamento maior longitudinal entre as Longitudes -45º e -55º, que também passam a possuir mais estações a partir de 2008. Outro fato que nos chama a atenção são os anos de 1991 e 1992. Pode-se notar que diversas estações deixaram de produzir dados. Segundo comunicação pessoal, ocorreram cortes de verbas que impossibilitaram a continuidade de medidas nestes anos. Outra importante observação nestes dados de distribuição é a relação posição e chuva. Quanto mais ao Oeste e Norte, maior a quantidade de precipitação e, por sua vez, quanto mais ao Sul e ao Leste, maiores as ocorrências de seca.

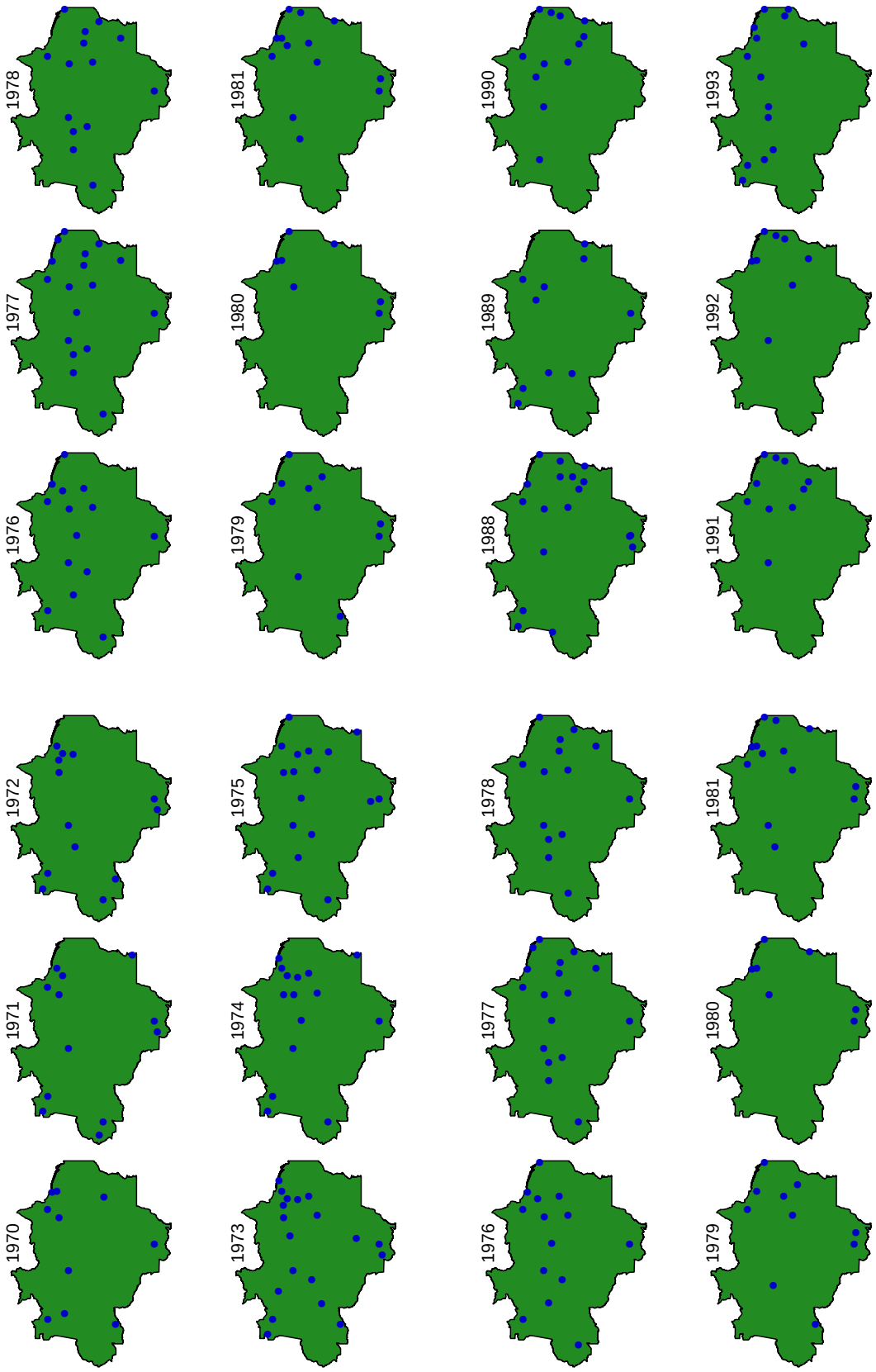


Figura 5.9 - Estações convencionais disponíveis para a análise a partir de 1970 até 1993.

Fonte: Produção do autor.

Figura 5.10 - Estações convencionais (azul) e automáticas (amarelo) disponíveis para a análise a partir de 1994 até 2017.

Fonte: Produção do autor.

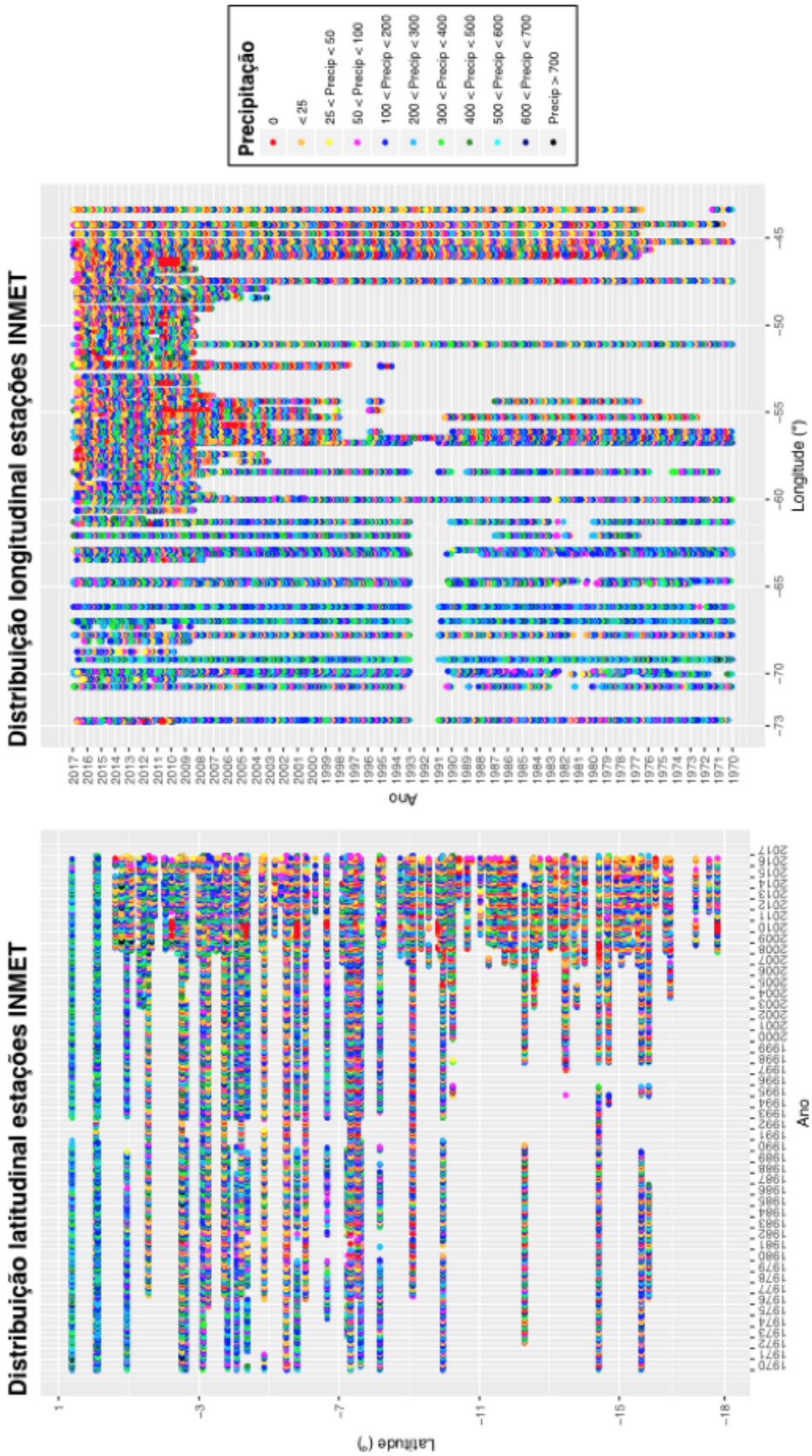
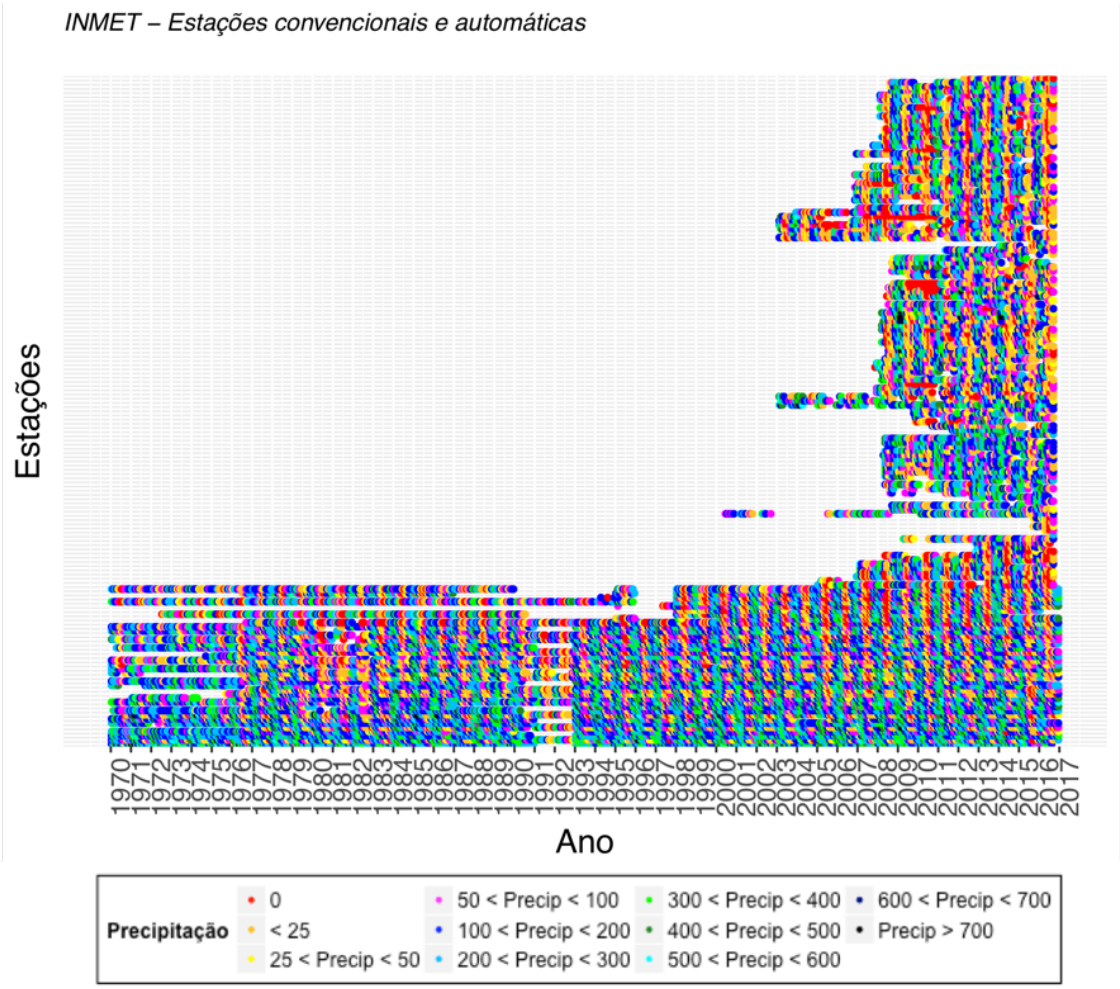


Figura 5.11 - Distribuição latitudinal (esquerda) e longitudinal (direita) em série temporal das estações INMET em escala de cores por precipitação.

Fonte: Produção do autor.

Quando comparadas as precipitações por Longitude observa-se um comportamento que varia em função do posição geográfica da estação, desta forma, para evitar que regiões com maior densidade de estações representassem maior peso nas médias dos parâmetros meteorológicos, foram determinadas grades 4º x 5º (Figura 4.24) e calculadas primeiramente as médias de cada quadrado e posteriormente a média para toda a região da Bacia. O fato, também, de haver discrepância com relação a quantidade de dados anuais disponíveis pelas estações, nos levou a observar o número de estações disponíveis por ano. Na Figura 5.12 pode-se observar a quantidade de estações disponíveis por ano em escala de cores referente à precipitação. Claramente vê-se que, a partir de 2008, com as instalações das estações meteorológicas Automáticas, houve um aumento da disponibilidade de estações, tornando os anos de objeto deste estudo, amplamente cobertos por dados, gerando confiança para a aplicação e análise dos mesmos.

Figura 5.12 - Quantidade de estações INMET disponíveis por ano desde de 1970.

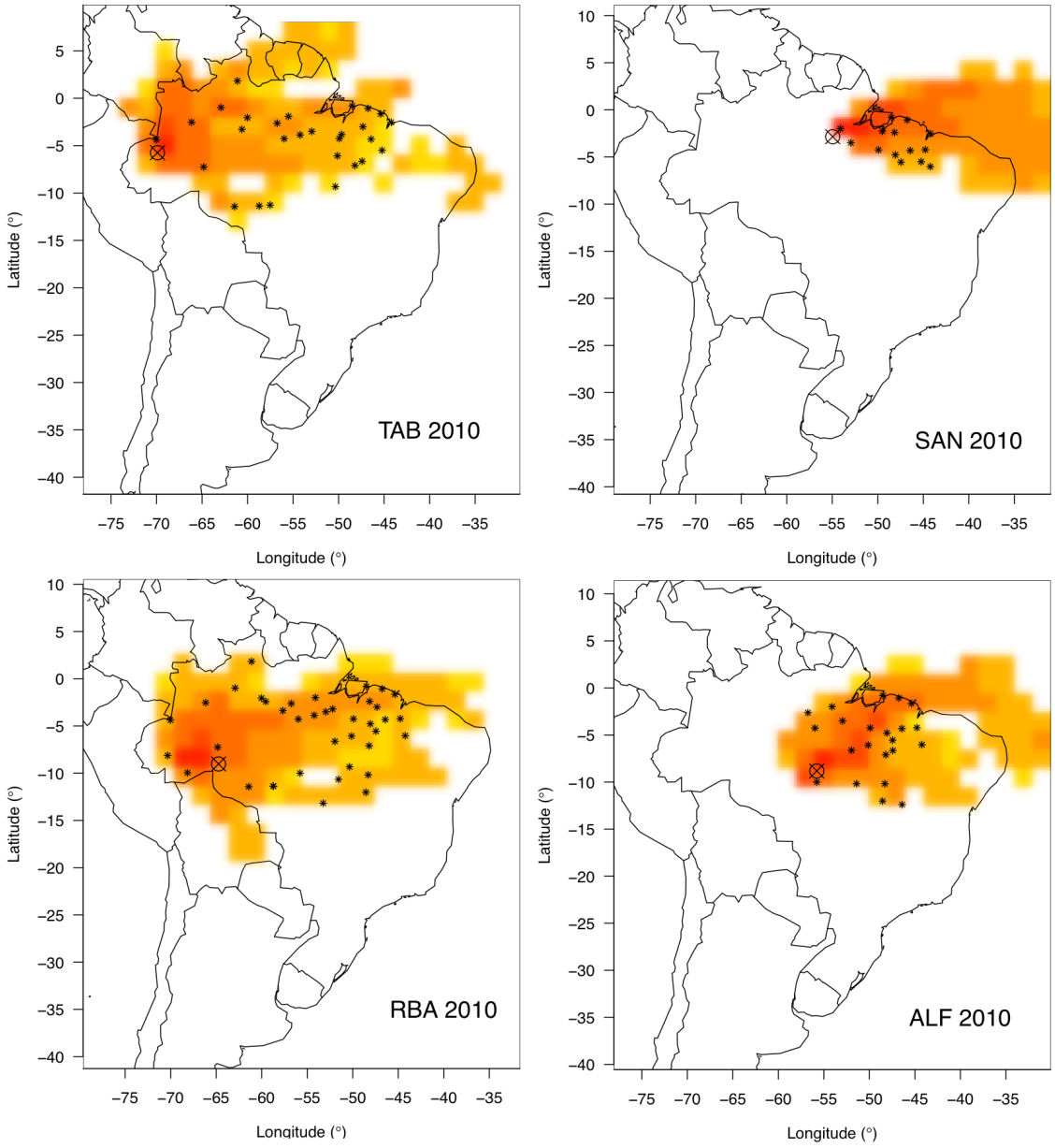


Fonte: Produção do autor.

5.2.1 Aplicação da área de influência (AI) nas variáveis climáticas

A intenção em entender o processo de emissões/absorções na Amazônia, nos gera a necessidade de uma análise em uma escala espacial mais próxima aos locais de amostragem. Entender o ciclo da Amazônia como um todo é de extrema relevância, no entanto, designar as principais fontes incidentes neste processo, é ferramenta crucial para a discussão dos eventos ocorridos em cada local de amostragem. Para tal, utilizando as AI calculadas para cada local de amostragem e por ano e, anexando as estações disponíveis dentro de cada respectiva AI, foi possível também aplicar metodologia disposta na secção 4.5, e calcular as variáveis climáticas incidentes em cada região. Na Figura 5.13 observa-se um exemplo das estações INMET incidentes em cada AI nos quatro locais de amostragem no ano de 2010. Esta mesma abordagem foi utilizada para a determinação do número de focos de queimada incidentes por AI.

Figura 5.13 - Estações INMET incidentes em cada AI nos quatro locais de amostragem no ano de 2010.



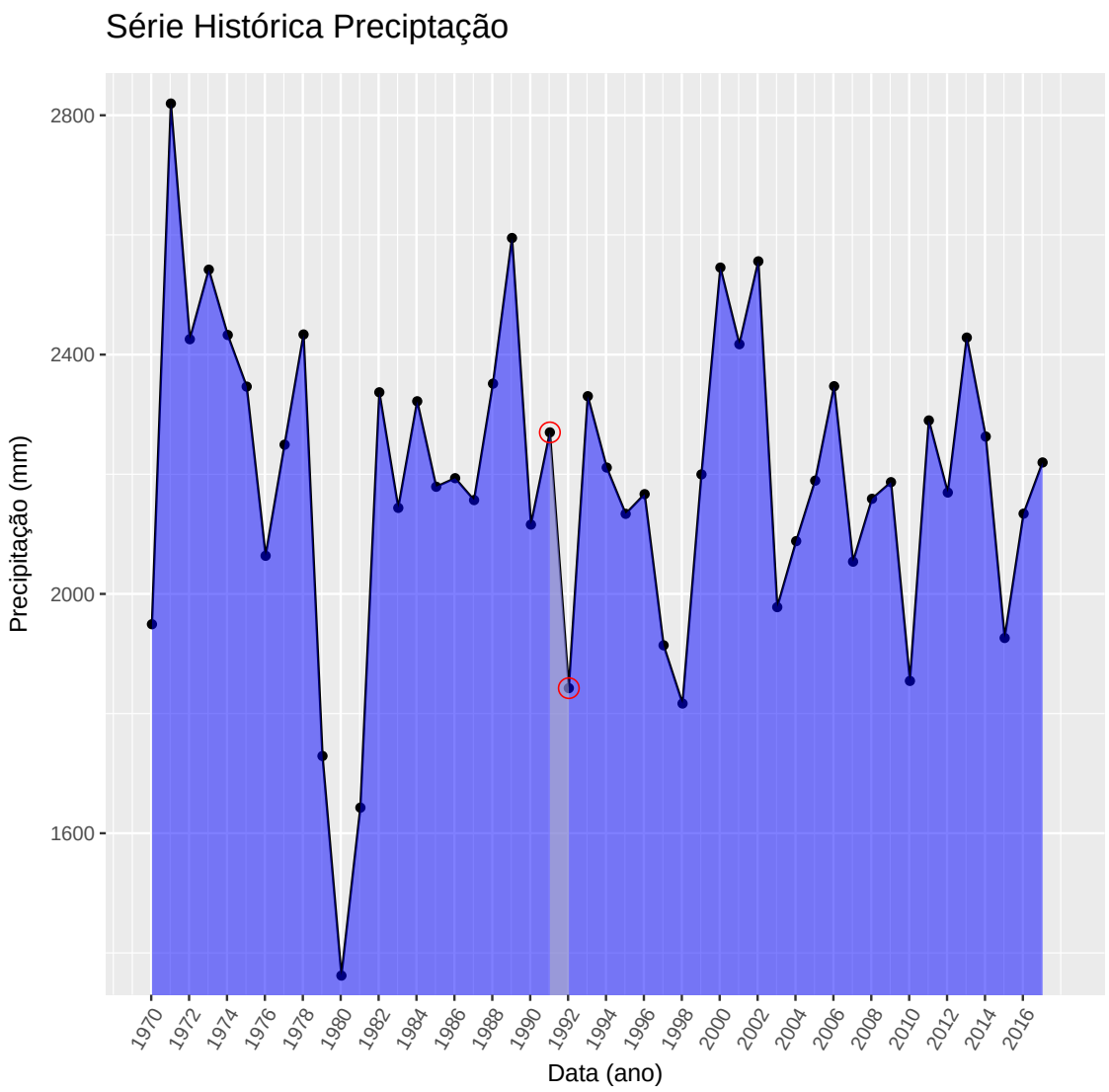
Fonte: Produção do autor.

5.3 Precipitação e temperatura na Bacia Amazônica

O aumento das secas na Amazônia estão associadas à mudanças nos padrões da circulação atmosférica (LI et al., 2006), principalmente na estação seca que impacta diretamente o funcionamento da floresta e gera aumento nas forçantes antrópicas sobre o clima como desflorestamento e, principalmente, a queima de biomassa (PHILLIPS et al., 2009; ARAGÃO et al., 2014). Extremos de precipitação e temperatura são apontados em diversos estudos como fatores com grande influên-

cia no comportamento da floresta Amazônica. Plantas quando expostas a deficit de água, geralmente reduzem sua capacidade de absorver carbono da atmosfera (MOLEN et al., 2011) e, juntamente com o aumento de temperatura, o comportamento de sumidouro da floresta pode ser comprometido (GATTI et al., 2014). Desta forma, compreender, monitorar e correlacionar os fatores de temperatura e precipitação com as emissões são fatores essenciais para a melhor compreensão das causas destas. Na Figura 5.14 pode-se observar a série histórica da precipitação média anual da Amazônia desde 1970 a 2017.

Figura 5.14 - Série temporal com precipitação média da Bacia Amazônica utilizando os dados INMET. Círculos em vermelho e área em azul destacando os anos 1991 e 1992.

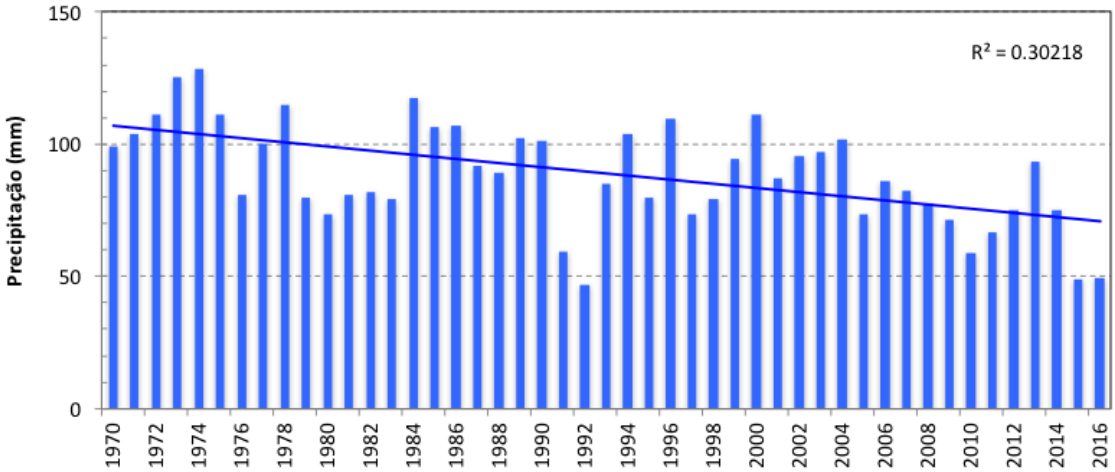


Fonte: Produção do autor.

Nesta série destacam-se alguns aspectos. O primeiro, em destaque na figura, os anos de 1991 e 1992. Conforme vê-se na Figura 5.9, são anos com baixís-

sima representatividade de estações INMET e, portanto, dados que podem não refletir a realidade. O segundo aspecto corresponde aos anos anteriores a 2004, que precedem as instalações das estações meteorológicas automáticas, demonstrando grandes picos de seca, como em 1980, ano o qual não ocorre registros acadêmicos de uma seca desta magnitude, sendo assim, conforme previamente citado, estes seriam dados com a necessidade de cautela em sua utilização. Em um terceiro aspecto, observa-se a confirmação dos picos de seca nos anos de 2010 e 2015 como apontam diversos estudos (GATTI et al., 2010; GATTI et al., 2014; LAAN-LUIJKX et al., 2015; ALDEN et al., 2016; KOREN et al., 2018; RIBEIRO et al., 2018), sendo os anos de 2011, 2013 e 2014 apontado o acontecimento de grande eventos de precipitação. Outra observação é que parece existir um tendência na diminuição da precipitação ao longo do tempo. Para checar estas informações, realizou-se um estudo no qual foram identificados os três meses com menores índices de precipitação durante os anos em análise, pode-se observar o resultado na Figura 5.15. Nesta observa-se que existe uma clara tendência de diminuição de precipitação durante a estação seca. Esta intensificação das secas poderá gerar como consequência, maior incidência de queimadas e modificação do comportamento da floresta.

Figura 5.15 - Série temporal com os três meses com menores índices de precipitação e linha de tendência dos dados analisados.

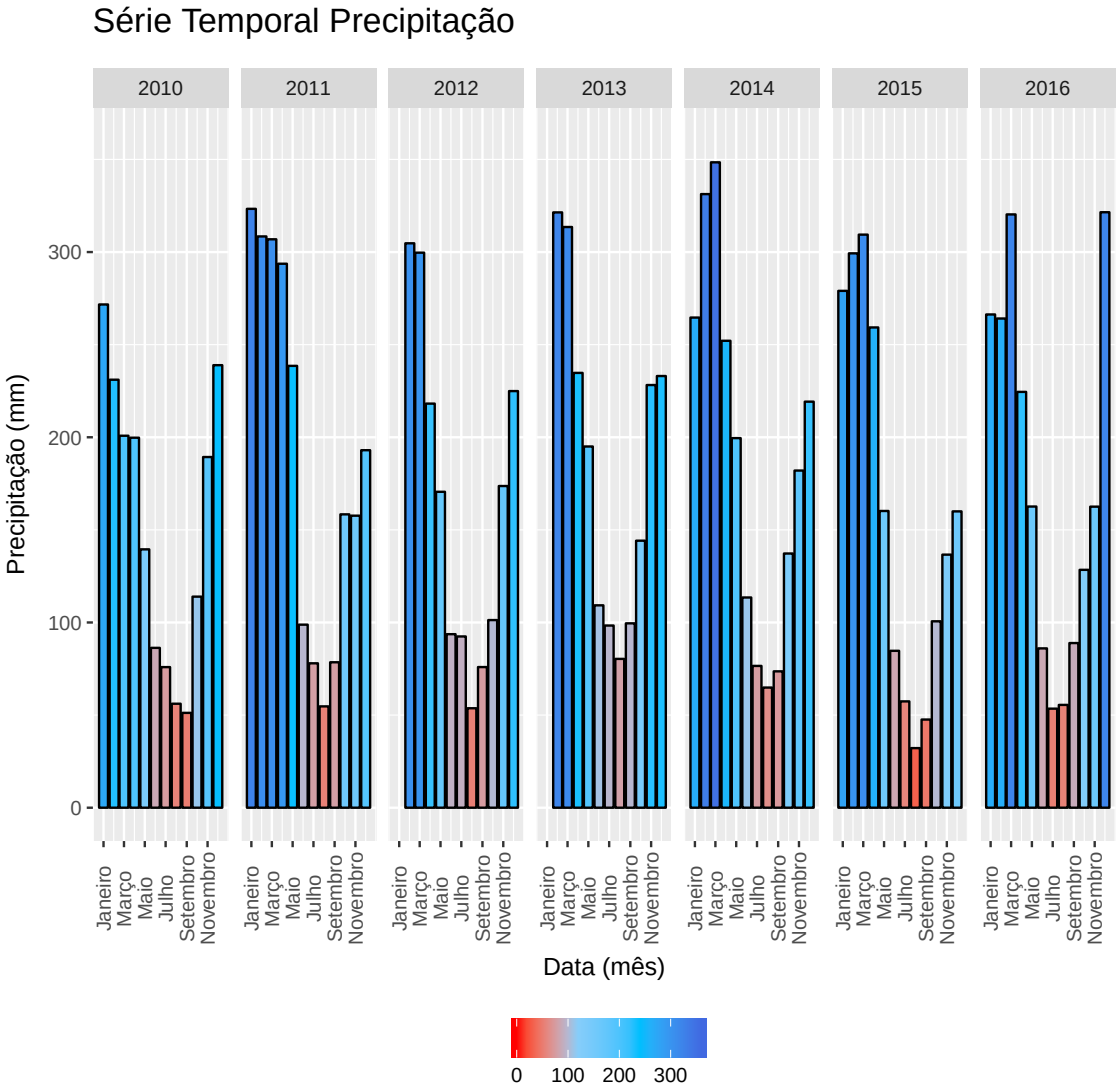


Fonte: Produção do autor.

Observando os dados os quais oferecem uma maior cobertura das estações INMET, na Figura 5.16 vê-se as médias mensais da série temporal de precipitação da Bacia Amazônica no período de 2010 a 2016 em escala de cores, as barras em tom azul indicam estação chuvosa e em tom avermelhado indicam estação seca por apresentarem índices menores do que 100 mm. Este limite é instituído devido à evapotranspiração das copas das árvores no ambiente Amazônico que é considerado a uma taxa constante em torno de 100 mm por mês (ARAGÃO et al.,

2014). A estação chuvosa ocorre tipicamente entre os meses de novembro a maio, apresentando variações ano a ano. O período mais intenso da estação ocorre entre janeiro e março, e o pico da estação seca ocorre de julho a setembro. Assim como demonstra a Figura 5.14, as secas mais intensas ocorreram nos anos de 2010, 2015 e 2016. Nestes últimos, pode-se observar uma seca anormal em outubro de 2015 e findada em fevereiro de 2016, meses com históricos de maiores índices de precipitação. Este período é coincidente com o fenômeno do *El Ninõ* com início em outubro de 2015 e fim em março de 2016 (GLOOR et al., 2018).

Figura 5.16 - Série temporal de precipitação nos anos de 2010 a 2016 mostradas em escala de cores.

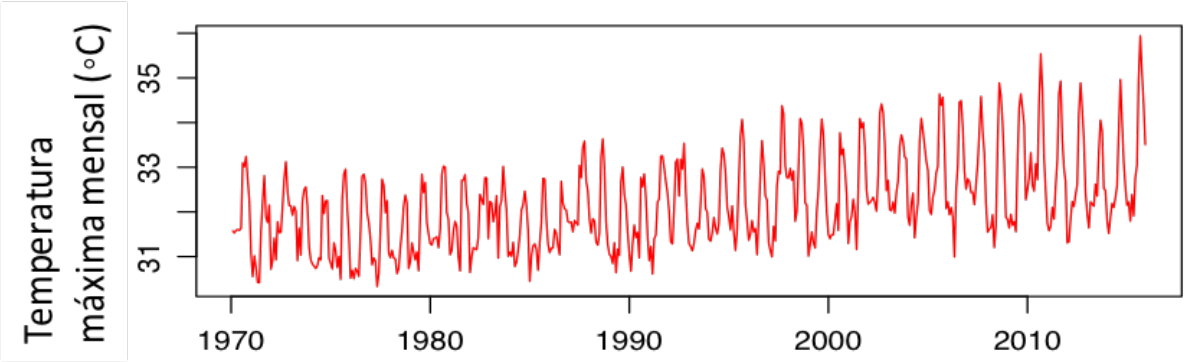


Fonte: Produção do autor.

Relações negativas de índices de precipitação em eventos de fortes *El Niño* são frequentemente indexadas à eventos com aumento nos índices máximos

de temperatura (GLOOR et al., 2018). Na Figura 5.17 é apresentada a série histórica das temperaturas máximas médias mensais. Observa-se um claro aumento da temperatura máxima na Amazônia ao longo do período e também o aumento da amplitude na variação da temperatura entre os meses de um ano. Aproximando-se os dados ao período de 2010 à 2016, desta vez utilizando a temperatura média destes anos e comparando-os à temperatura média histórica no período compreendido entre 1970 e 2009 (Figura 5.18), vê-se que as temperaturas atuais estão elevadas em relação à média histórica, mesmo levando em consideração a amplitude demonstrada pelas barras de erro. Os anos com secas severas (2010, 2015 e 2016) são os que apresentaram as maiores temperaturas tanto na estação seca, quanto na chuvosa, aumentado principalmente a interferência na capacidade de absorção de carbono (GATTI et al., 2014; GLOOR et al., 2018). 2013, como vê-se na Figura 5.14, foi o ano com maiores índices de chuva, praticamente não rompendo o limite estabelecido dos 100 mm, foi ano que apresentou a temperatura mais próxima à média histórica e, por consequência, o ano com menor temperatura média no período.

Figura 5.17 - Série temporal de temperatura máxima média mensal da Bacia Amazônica realizada com os dados INMET.

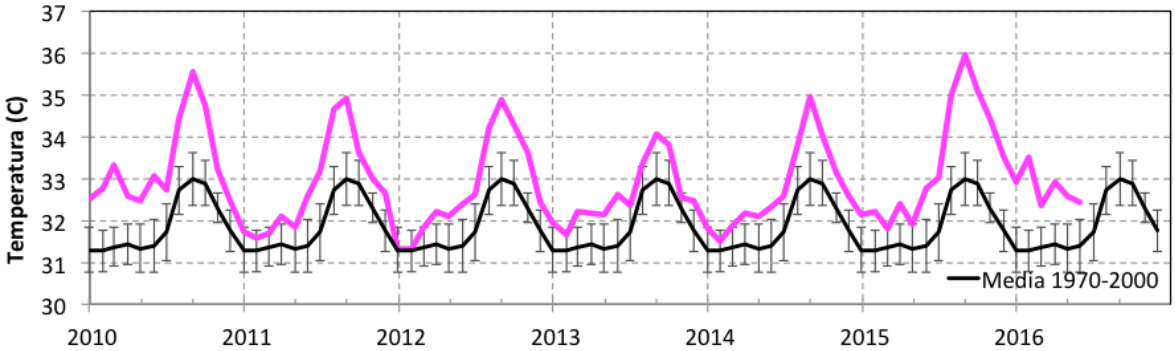


Fonte: Produção do autor.

Utilizando a base de dados globais atmosféricos ERA-Interim, realizou-se a comparação do crescimento da temperatura, com os dados fornecidos pelo INMET. Na Figura 5.19, demonstra-se esta comparação. Ambas bases de dados fornecem uma resposta confirmando a tendência de aumento da temperatura média na Bacia Amazônica. Segundo a base de dados INMET, no período compreendido entre 1979 e 2017, ocorreu um aumento de 1,155 °C na temperatura média na Bacia Amazônica. Já a base de dados ERA-Interim apresenta um crescimento de 1,160 °C. Apesar de apresentarem resultados absolutos com uma diferença média de 2 °C, ambas as bases de dados apresentam resultados com tendências muito próximas o que serve como validação da metodologia proposta e confirma a ex-

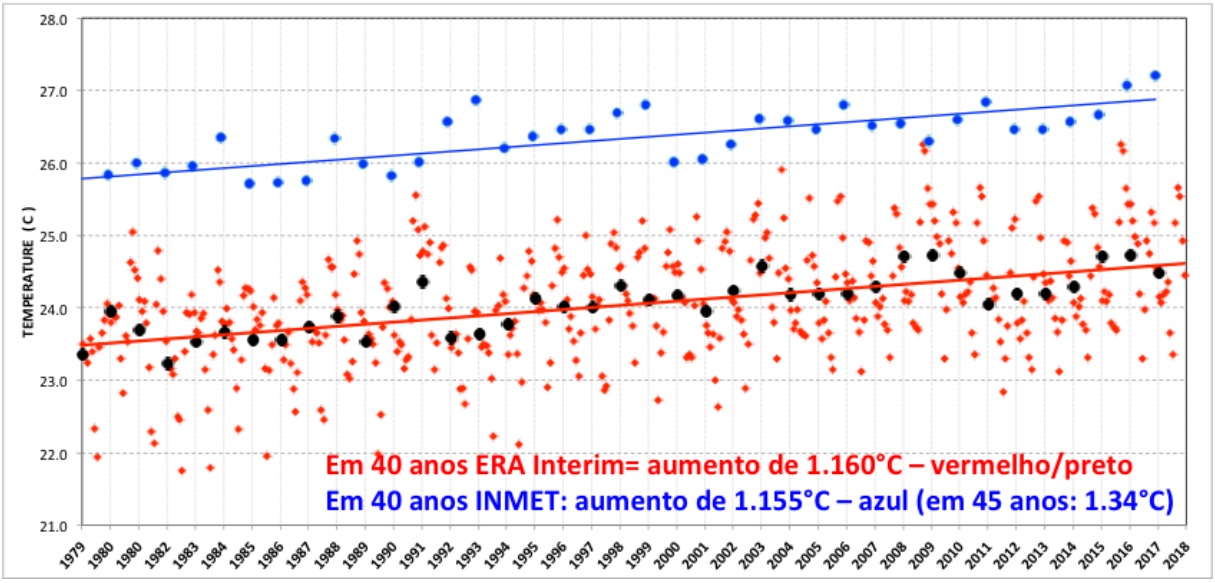
pectativa de aumento na temperatura da Bacia Amazônica. Neste mesmo período, à título de comparação, em 2018 a temperatura média global apresenta uma anomalia positiva de 0,8 ºC (NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA), 2017).

Figura 5.18 - Comparação da temperatura média mensal no período de 2010 a 2016 (linha em rosa) com a temperatura média mensal no período histórico compreendido entre 1970 a 2000 (linha em preto).



Fonte: Produção do autor.

Figura 5.19 - Comparação da temperatura media anual no período de 1979 a 2017 utilizando as bases de dados INMET (azul) e ERA-Interim (vermelho com médias mensais e médias anuais em preto).

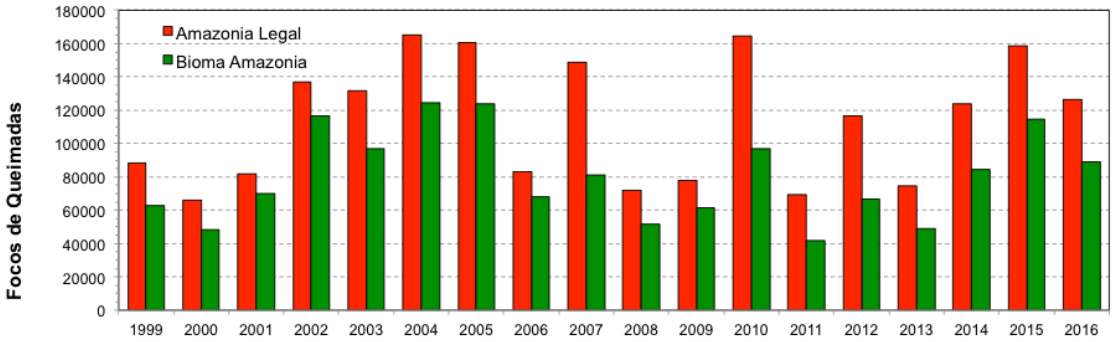


Fonte: Produção do autor.

5.4 Queima de biomassa na Bacia Amazônica

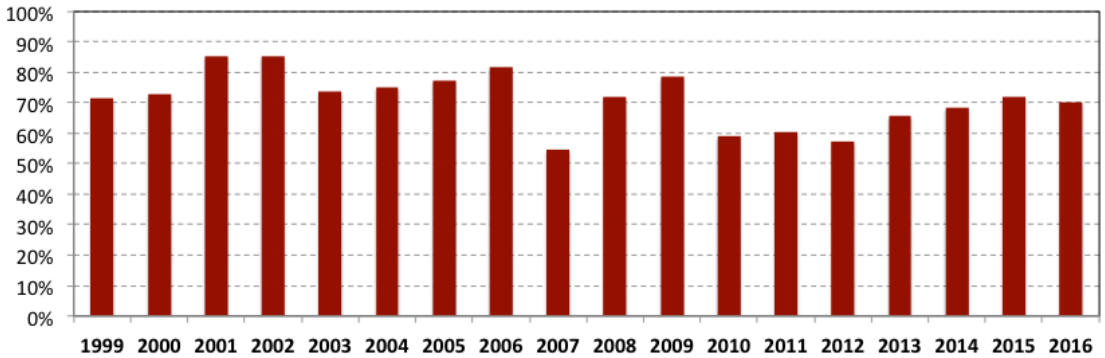
As emissões de CO estão diretamente relacionadas com a queima de biomassa na Bacia Amazônica (ANDREAE; MERLET, 2001; GATTI et al., 2010; GATTI et al., 2014), por esta razão, avaliar o comportamento desta é uma ferramenta auxiliar na interpretação das concentrações medidas de CO e CO_2 nos perfis verticais deste estudo. Na Figura 5.20, observa-se um máximo de queimada nos anos de 2004 e 2005, com posterior redução. No entanto, após este período ocorreram dois anos com queimadas intensas em 2010 e 2007. Fato preocupante é a constatação do aumento do número de queimadas dentro do Bioma Amazônia, significando aumento de queimas dentro da região de floresta, conforme observa-se na Figura 5.21 que demonstra este aumento a partir de 2012, ano no qual o código florestal foi modificado, chegando à 70% a fração de focos ocorrendo dentro da área do bioma Amazônia, o que aumenta a possibilidade de queimadas em regiões de florestas.

Figura 5.20 - Número de focos de queimada na região da Amazônia Legal em vermelho e, em verde, o número de focos de queimada no Bioma Amazônia.



Fonte: (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE), 2018)

Figura 5.21 - Correlação do número de focos de queimada ocorridos em toda a Bacia Amazônica com o número de focos de queimada ocorridos no Bioma Amazônia.



Fonte: (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE), 2018)

5.5 Estudo das razões CO:CO_2 e a concentração de CO.

Em continentes tropicais, a queima de biomassa e a oxidação de Compostos Voláteis Orgânicos (VOC), representam as principais contribuições de CO atmosférico, especialmente na baixa troposfera (DUNCAN et al., 2007). Este último possui uma pequena modificação sazonal, o que o promove certa constância neste fenômeno (DUNCAN; LOGAN, 2008), em contraste, a queima de biomassa ocorre em maior intensidade na estação seca fazendo do monóxido de carbono um excelente traçador de queima de biomassa e utilizado em diferentes escalas (WERF et al., 2006; ANDREAE et al., 2012; GATTI et al., 2010; GATTI et al., 2014). ANDREAE et al., 2012, destaca que considerando a importância do desflorestamento em regiões tropicais pela queima de biomassa tanto em escala regional, quanto em uma escala global, poucos estudos sobre as razões de emissão CO:CO_2 foram executados.

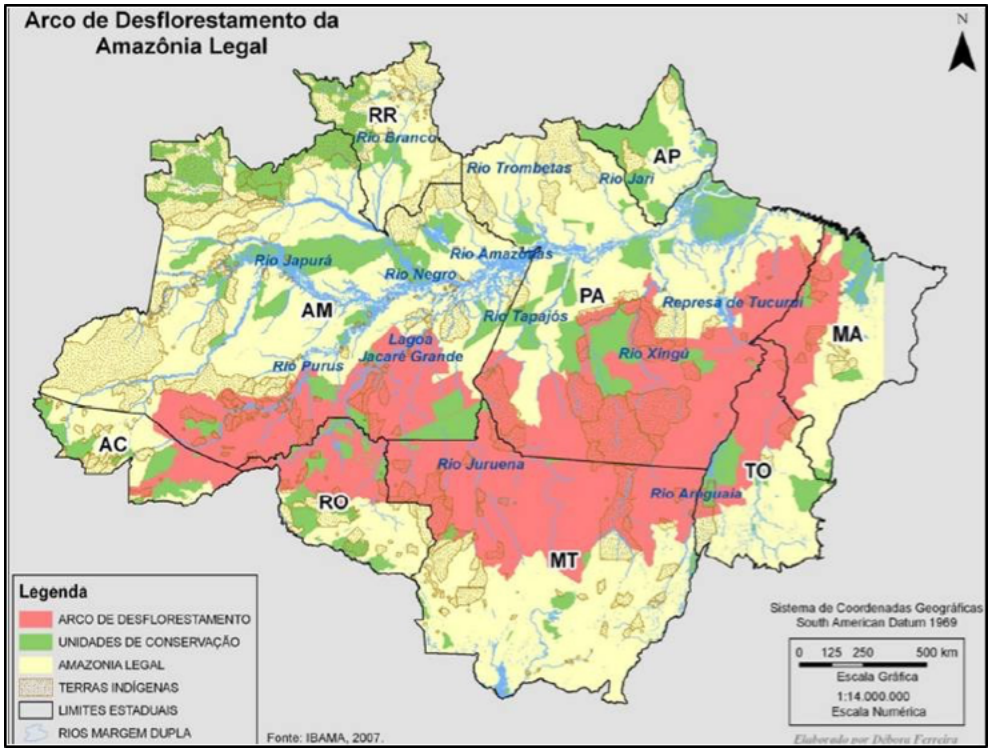
Neste sentido, em uma base de cerca de 500 perfis verticais, foram selecionados e analisados 66 perfis com características de queima de biomassa. Em ALF foram encontrados 16 perfis com características de queima de biomassa conforme secção 4.4. Em RBA 13 perfis, em SAN 8 perfis e, em TAB e TEF, apenas 3 perfis. Estes serão apresentados e discutidos nas secções à seguir.

5.5.1 Alta Floresta - ALF

ALF está localizada no extremo norte do estado de Mato Grosso, e inserida em região a qual o desmatamento na Amazônia brasileira tem se concentrado chamada de ”Arco do Desflorestamento” (DOMINGUES, 2013). Região esta caracterizada por onde a fronteira agrícola avança em direção à floresta (INSTITUTO DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA (IPAM), 2019) e grande parte desse desmatamento, que é seguido de queimada, tem ocorrido em áreas legalmente protegidas pela legislação florestal como Áreas de Preservação Permanente e Reserva Legal (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA), 2019). São 500 mil km^2 de terras que vão do leste e sul do Pará em direção oeste, passando por Mato Grosso, Rondônia e Acre (INSTITUTO DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA (IPAM), 2019). Na Figura 5.22 pode-se observar uma ilustração com a localização em vermelho do Arco do Desflorestamento.

Portanto, não nos surpreende o fato de que ALF foi onde foram encontrados o maior número de perfis nos quais as concentrações tanto de CO quanto de CO_2, apresentaram comportamentos de queima de biomassa e, atendendo aos critérios metodológicos, totalizando 16 perfis. Na Tabela 5.2 apresenta-se a série temporal com os resultados das razões CO:CO_2 obtidos para ALF juntamente com o coeficiente de correlação (R^2) e o desvio padrão (SD) de cada um dos perfis e, em uma representação gráfica destes na Figura 5.23.

Figura 5.22 - Mapa da Amazônia Legal destacando a área do Arco do Desflorestamento em vermelho.

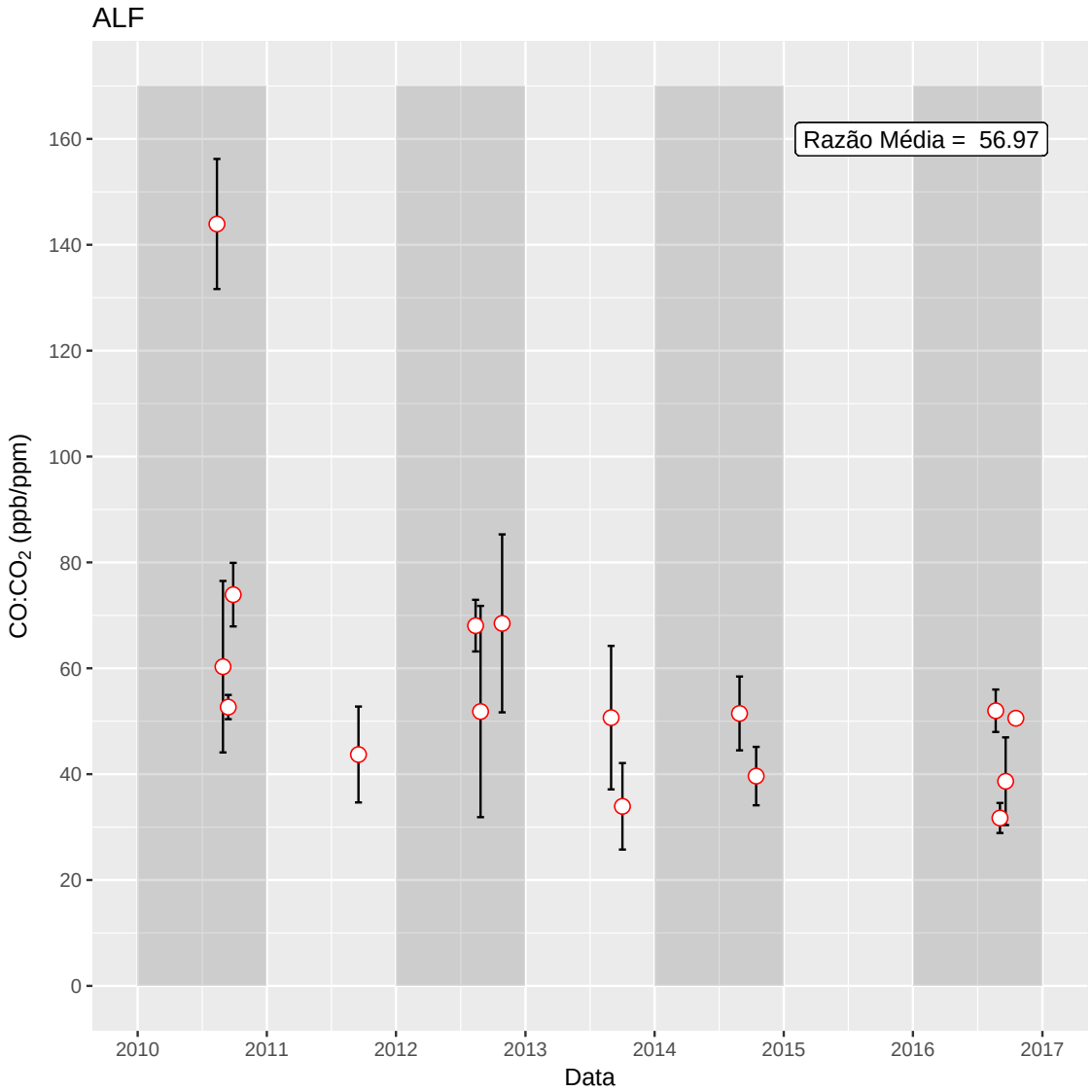


Fonte: (INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA), 2008)

Tabela 5.2 - Perfis os quais foram utilizados para a determinação da razão $CO:CO_2$ em ALF. Na tabela vê-se a data dos perfis, o coeficiente de correlação, a razão $CO:CO_2$ e o desvio padrão relacionado à cada perfil.

Data	R2	CO:CO2	SD
13/08/10	0.96	143.93	12.29
30/08/10	0.87	60.30	16.20
14/09/10	0.99	52.68	2.29
28/09/10	0.99	73.91	6.00
17/09/11	0.92	43.71	9.06
13/08/12	0.97	68.05	4.88
27/08/12	0.69	51.83	19.95
27/10/12	0.81	68.48	16.81
31/08/13	0.87	50.67	13.56
02/10/13	0.85	33.92	8.17
29/08/14	0.95	51.47	6.97
15/10/14	0.93	39.64	5.52
22/08/16	0.99	51.98	4.01
03/09/16	0.97	31.72	2.83
19/09/16	0.96	38.66	8.28
18/10/16	0.99	50.57	0.96

Figura 5.23 - Distribuição gráfica dos resultados de $CO:CO_2$ para ALF.



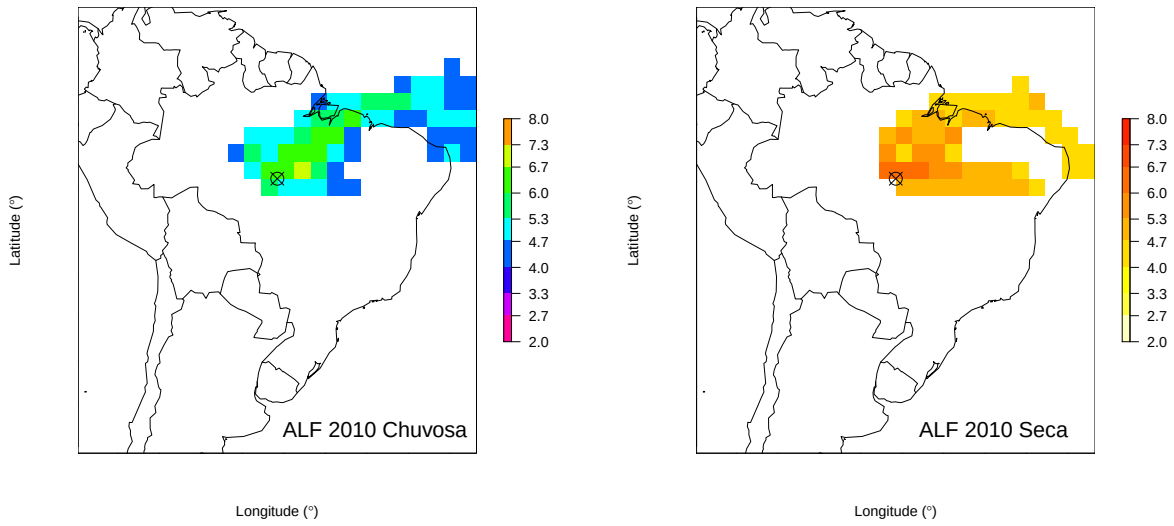
Fonte: Produção do autor.

Vê-se que o ano o qual foram encontrados os maiores valores e o maior número de perfis com razões $CO:CO_2$ foi ano de 2010 e apresentando perfis com grande dispersão dos valores, haja vista a amplitude do desvio padrão (Figura 5.23), o que indica a proporção da pluma de queima de biomassa. No entanto, ao avaliar os valores em si (vide Tabela 5.2), nota-se uma disparidade entre os valores do mês de agosto e setembro. Sabe-se que a tarefa de determinar as razões $CO:CO_2$ possuem grandes dificuldades, as emissões podem sofrer grandes variações pois dependem do fogo, da condição do objeto submetido a este, ao processo de emissões de fumaça já que, as etapas fogo e fumaça, podem estar separadas por longos períodos de tempo (ANDREAE et al., 2012), além do processo de decomposição de árvores ”mortas”, que continuam emitindo gases durante anos após sua derrubada.

Todavia, alguns parâmetros servem para que possam nos trazer indicativos dos motivos das diferenças entre as razões.

Separando as áreas de influência entre as estações seca e chuvosa (Figura 5.24), vê-se que a estação seca possui influência da parte centro-nordeste do país, região a qual integra parte do bioma Cerrado.

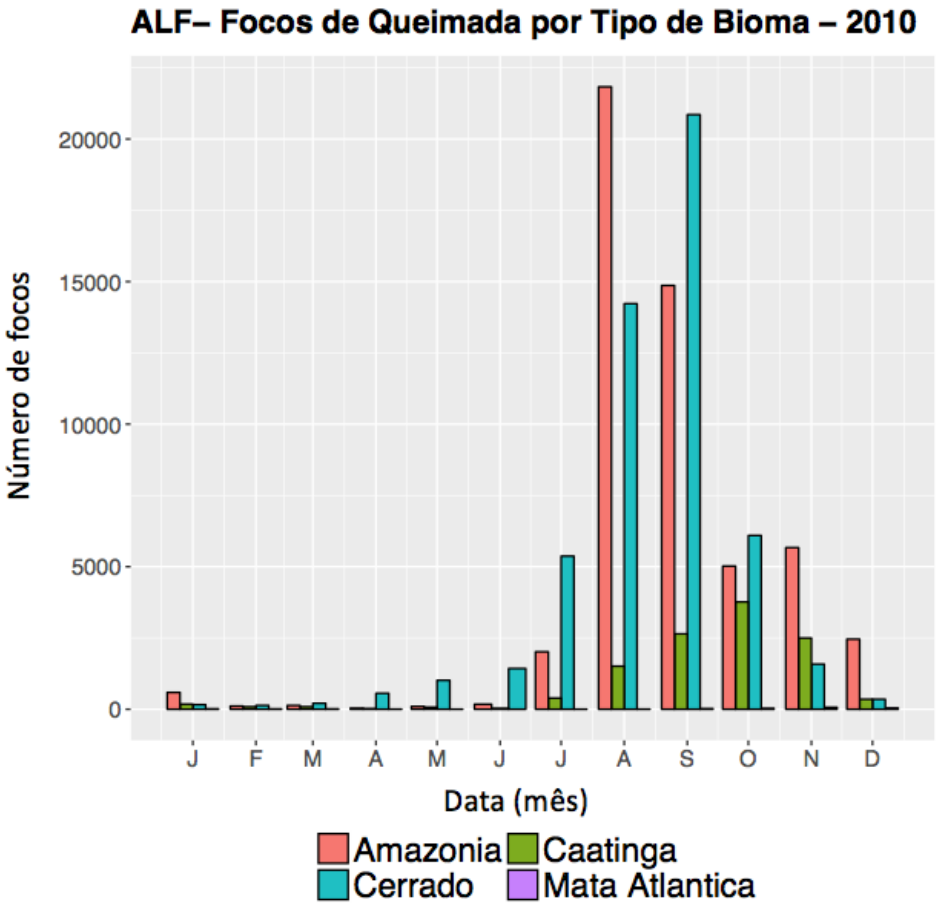
Figura 5.24 - Área de Influência das estações chuvosa (tons em azul) e seca (tons em vermelho) para ALF no ano de 2010.



Fonte: Produção do autor.

Após a separação das áreas de influência, foram calculados o número de focos de queimada incidentes nesta área e sua classificação por bioma. Na Figura 5.25 pode-se ver os resultados mensais com o número de focos de queimada e sua classificação.

Figura 5.25 - Focos de queimada por tipo de bioma para a AI de ALF na estação seca.

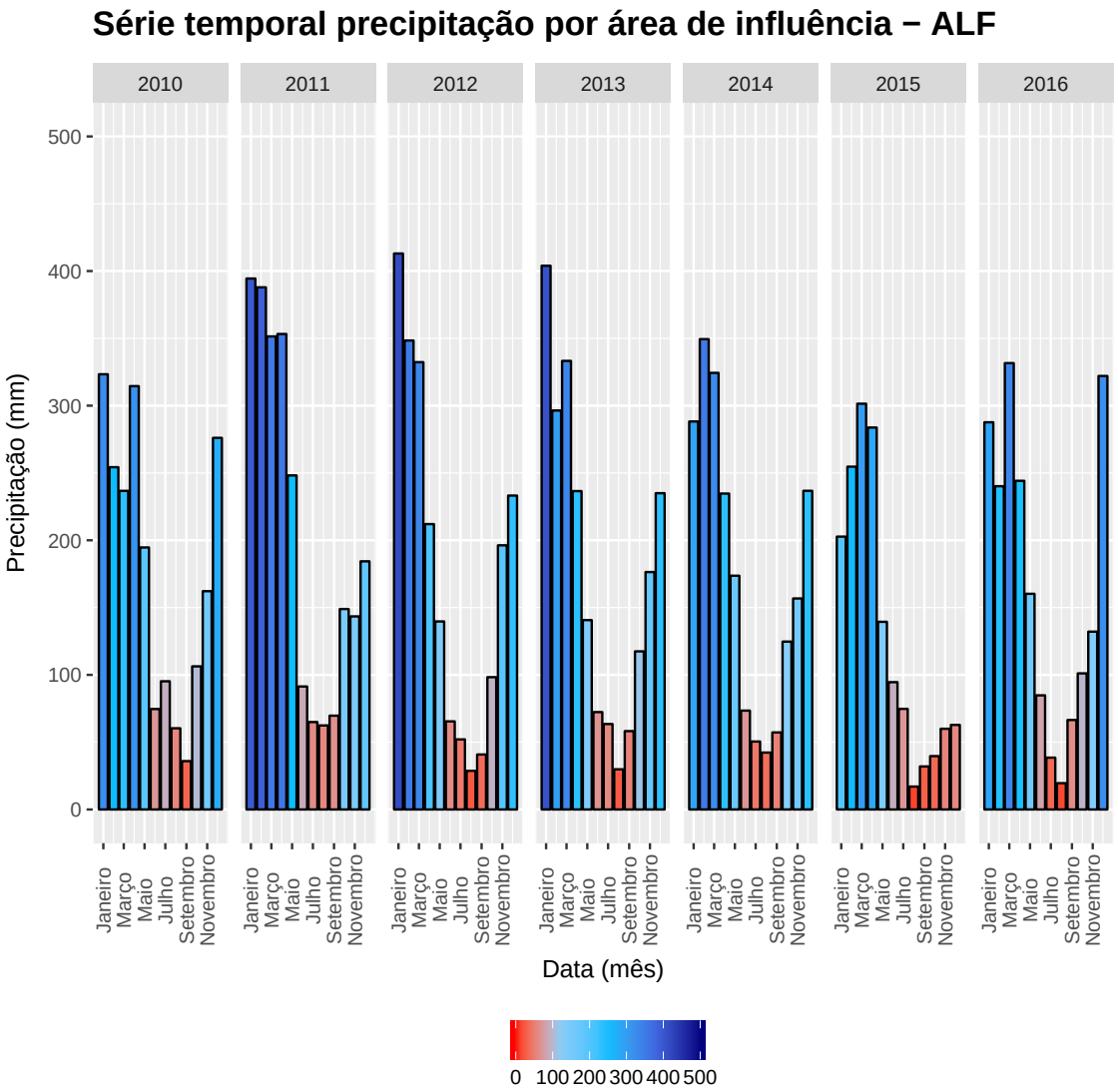


Fonte: Produção do autor.

Como vê-se o pico do número de focos de queimada ocorreu nos meses de agosto e setembro, justamente os quais foram encontrados os valores para as razões $CO:CO_2$. Nota-se porém, a diferença por tipo de bioma submetido à queima. Em agosto ocorreu uma grande queima no bioma Amazônia, composto amplamente por vegetação nativa florestal (cerca de 80% do território) caracterizada como Floresta Ombrófila Densa (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2007) o que torna o combustível mais suscetível à queimas incompletas, com maiores emissões de CO e, consequentemente, maiores valores para as razões. Já no cenário no mês de Setembro, apesar de grande contribuição na queima do bioma Amazônia, a predominância ocorreu no bioma Cerrado, caracterizado com cerca de 30% de floresta nativa, com densa ocupação antrópica e árvores mais esparsas em relação ao bioma Amazônia (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2007).

Outro importante fator a ser analisado é a distribuição da precipitação dentro da AI. Na Figura 5.26 observa-se estes dados.

Figura 5.26 - Série temporal da precipitação na AI de ALF.



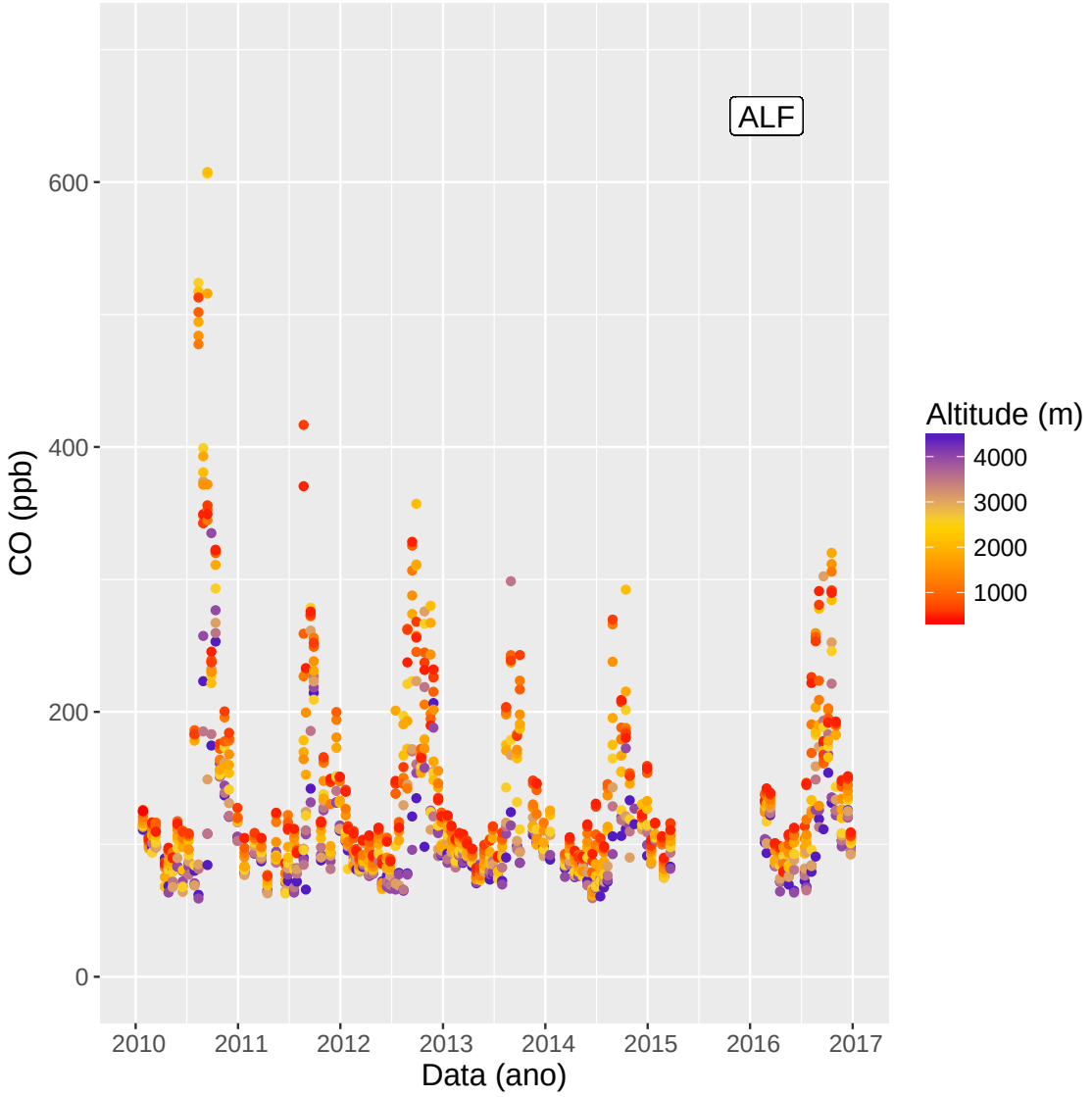
Fonte: Produção do autor.

É importante observar que os anos de 2010, 2015 e 2016 foram anos nos quais as estações secas, além de apresentarem baixos índices pluviométricos, foram precedidos por estações chuvosas com índices menores do que em relação aos anos de 2011 à 2013. 2015 impressiona pela extensão do período de seca praticamente iniciando em maio com duração até o final do ano, ressaltando a influência do *El Niño* neste período. Esta também demonstra a importância da análise na AI. Quando verificada a precipitação da Amazônia Legal como um todo (Figura 5.16), 2015 apresentou um ano seco, porém não com a intensidade ocorrida na AI de ALF.

Pelo cenário apresentado em 2015, esperava-se a caracterização de grandes emissões por queima de biomassa, no entanto, infelizmente, não foram executados medidas por perfis de aviões no período da estação seca mas oa re-

flexoa deste ano se prolongaram ao ano conseguinte, como pode-se ver na Figura 5.27, onde apresenta-se a série temporal das concentrações de CO.

Figura 5.27 - Série temporal da concentrações de CO para o local de amostragem ALF apresentado em escala de cores por altitude de coleta.



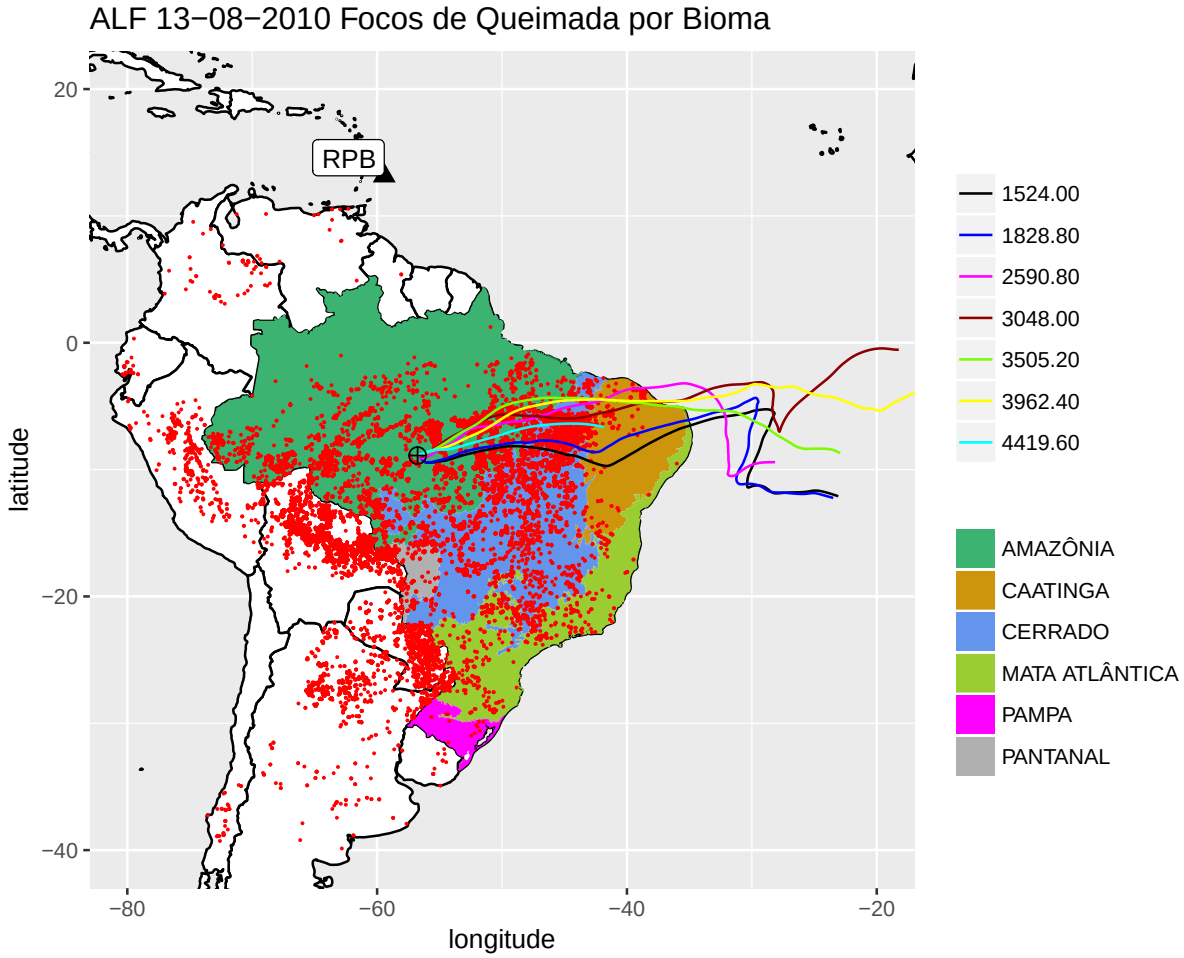
Fonte: Produção do autor.

Nesta, vê-se alguns pontos interessantes. Por estar em escala de cores por altitudes as quais quão mais vermelha mais próxima ao solo, observa-se que as maiores concentrações encontram-se em menores altitudes, principalmente nos meses de estação seca, demonstrando a influência da queima de biomassa e o rápido espalhamento na atmosfera pelo processo de convecção, no entanto, também observa-se alguns pontos com maiores altitudes apresentando altas concentrações, processo este que pode indicar uma forte convecção transportando as

emissões da superfície rapidamente a maiores altitudes ou a influência de plumas antigas carregando informações de queimadas em outras regiões afastadas ao local de amostragem, já que a meia vida do CO em regiões tropicais é de cerca de 20 dias (MILLER et al., 2007).

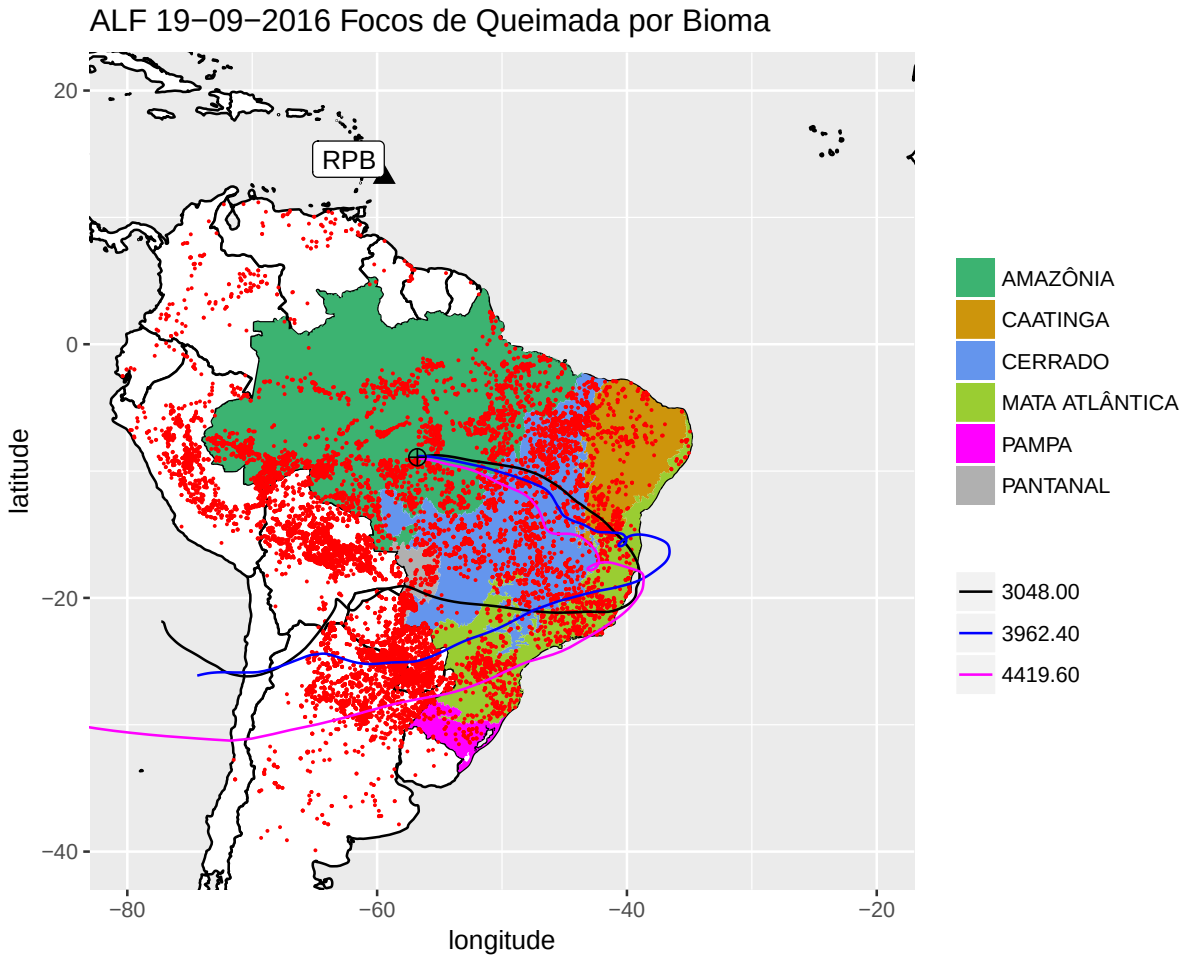
Nas Figuras 5.28 e 5.29 pode-se observar ocasiões sobre os dois exemplos citados. Nestas demonstra-se as trajetórias utilizadas para o cálculo das razões $CO:CO_2$ e os focos de queimadas ocorridos no período de duração destas. Na primeira a ocorrência de um grande número de focos de queimada próximos ao local de amostragem e com trajetórias com curto período de tempo e, a segunda, trajetórias que tomam um maior período de translado até o local de amostragem, trazendo também informações de queimadas de outras regiões.

Figura 5.28 - Trajetórias utilizadas para o cálculo da razão $CO:CO_2$, focos de queimada ocorridos no período de duração destas até o continentes (pontos em vermelho) distribuídos pelos biomas brasileiros em agosto de 2010.



Fonte: Produção do autor.

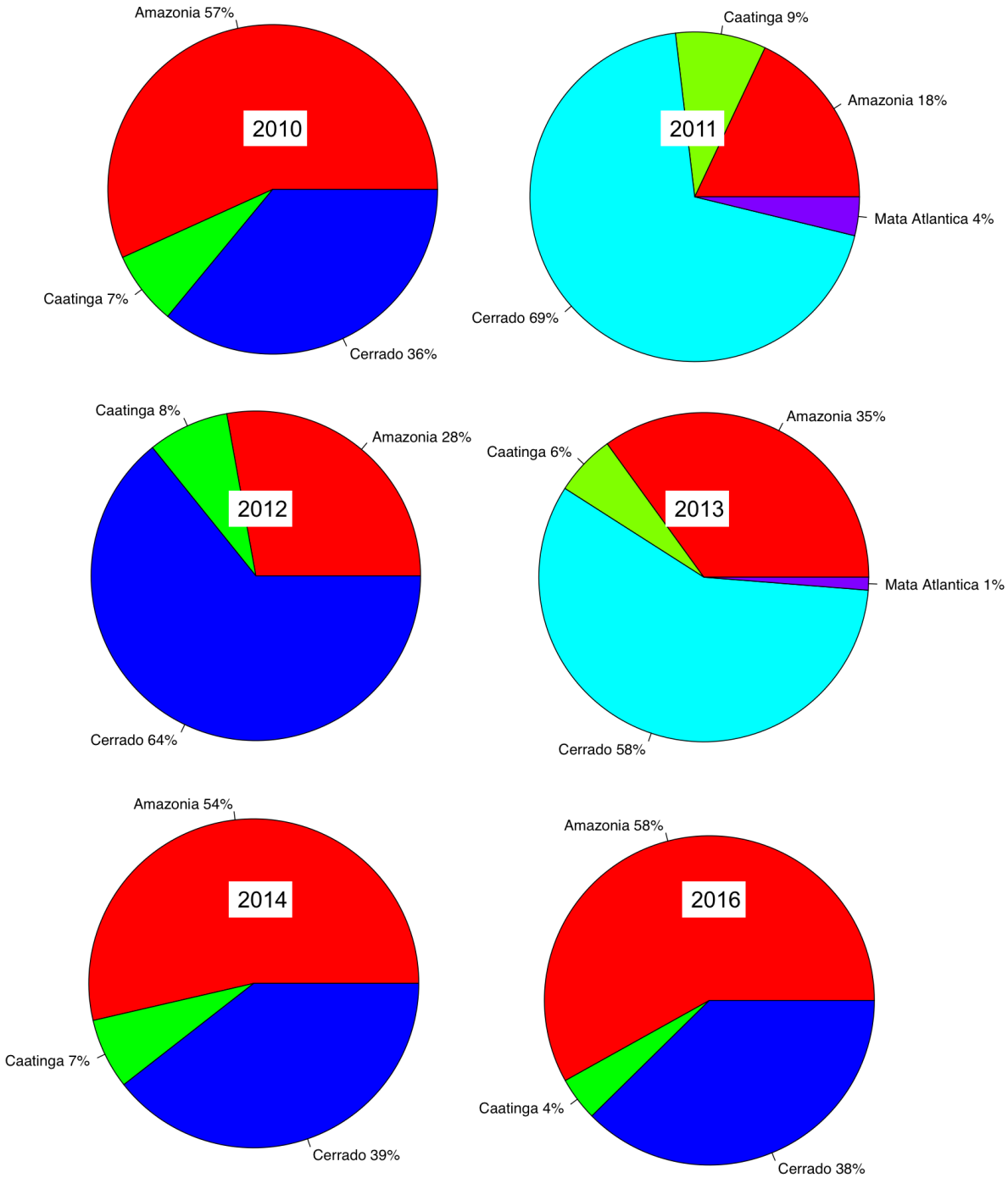
Figura 5.29 - Trajetórias utilizadas para o cálculo da razão $CO:CO_2$, focos de queimada ocorridos no período de duração destas até o continentes (pontos em vermelho) distribuídos pelos biomas brasileiros em setembro de 2016.



Fonte: Produção do autor.

Novamente tratando sobre as concentrações (Figura 5.27), 2010 foi o ano com os maiores índices de concentração de CO e, como citado, observa-se em 2016 um comportamento anormal nos meses inicias do ano, apresentando maiores valores de concentração de CO e com densa emissão nos meses de estação seca, assim como no ano de 2012, anos nos quais foram encontrados 4 e 3 perfis com características de queima de biomassa para a determinação das razões $CO:CO_2$. A Figura 5.30 apresenta a proporção do número de focos de queimada por bioma na AI de ALF para os anos de estudo.

Figura 5.30 - Relação de focos de queimada e tipo de bioma distribuídos pela AI anual de ALF.



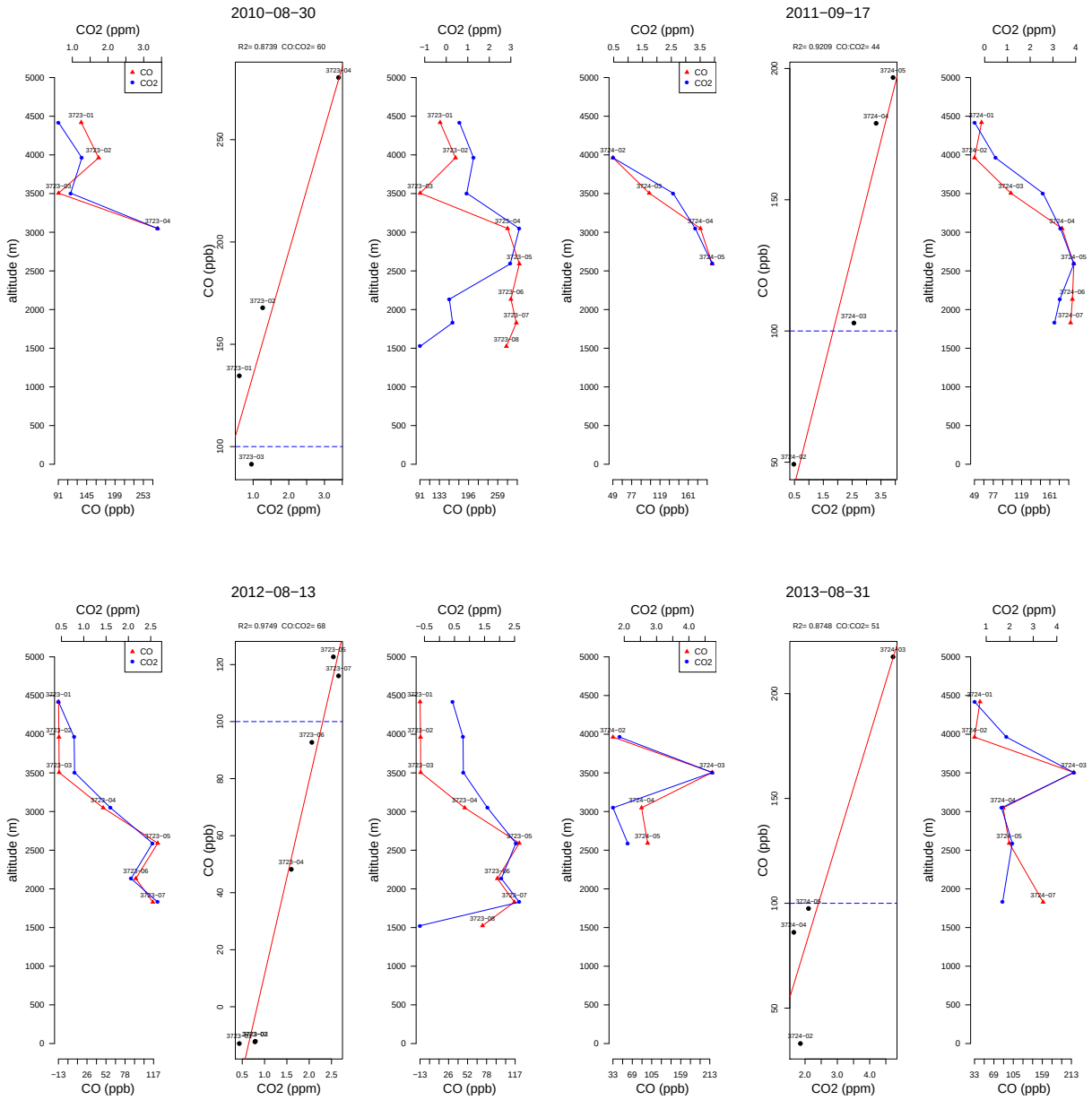
Fonte: Produção do autor.

Vê-se que existe uma forte influência do bioma Cerrado nos resultados das razões $CO:CO_2$ e, consequentemente, nas concentrações de CO. Neste bioma, ocorre o consumo pelo fogo em combustíveis secos e de baixas dimensões,

tornando o fogo mais eficiente (FEREK et al., 1998), afetando desta forma, a razão $CO:CO_2$ média para o local de amostragem ALF com o valor de 57 $\pm$ 26 ppb/ppm, valor abaixo do preconizado em outras publicações sobre o estudo das razões $CO:CO_2$ que, no entanto, não apresentam resultados separando a parte Leste da Amazônia dos demais valores. ANDREAE et al., 2012 é um dos poucos estudos com medidas de perfis de avião que incluiu a parte Leste da Amazônia em conjunto com a Amazônia central, mostrando resultado para a razão $CO:CO_2$ de 66 $\pm$ 23 ppb/ppm.

Por fim, na Figura 5.31, pode-se observar quatro perfis dos 16 selecionados. Nesta vê-se o mesmo perfil em três formas: a primeira as altitudes (frascos) utilizados no cálculo da razão, a segunda o gráfico realizado para o cálculo da equação da reta opondo as concentrações de CO e CO_2 e determinação do coeficiente angular e, consequentemente, a razão $CO:CO_2$. Também, na segunda figura as linhas pontilhadas em azul mostrando os limites de 100 ppb para CO e 0 ppm para CO_2. Na terceira figura de cada data, o perfil vertical completo, sem cortes.

Figura 5.31 - Perfis CO:CO_2 utilizados para o cálculo da razão em ALF.



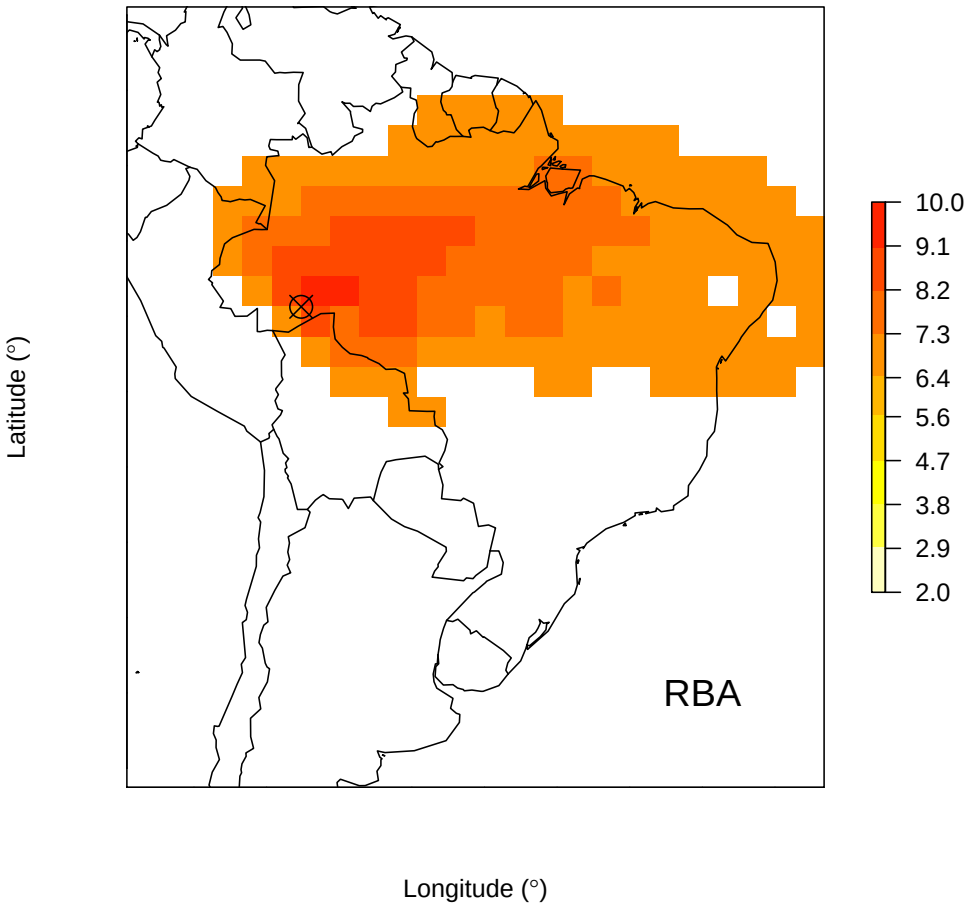
Fonte: Produção do autor.

5.5.2 Rio Branco - RBA

O local de amostragem RBA poderia ser definido como uma representatividade mista das regiões da Amazônia. Está próximo ao Arco do Desflorestamento e inserido em região com a presença de floresta nativa. Além disso, é o local com a maior AI entre os locais de amostragem, desta forma, exerce grande representatividade na resultante das emissões da Amazônia. Na Figura 5.32 pode-se observar a AI média entre os anos de estudo para RBA. Vê-se que a região central, em

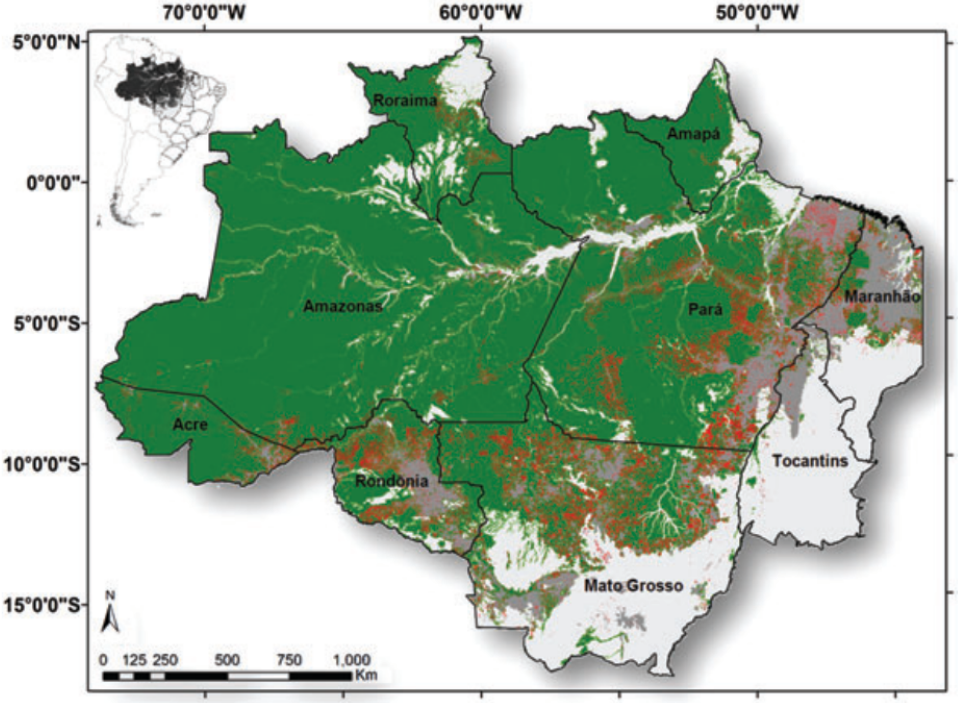
tons mais avermelhados, exercem as maiores influências nos resultados obtidos em RBA, devido à grande cobertura das trajetórias, também é representado os biomas Cerrado ao sul da região da floresta tropical e Caatinga ao longo da costa nordeste do Brasil, com a presença de Savanas e pastagens. Há ainda a participação de grandes cidades, Belém, Manaus, Rio Branco e Porto Velho. Esta análise é mais evidente quando comparamos a área de influência de RBA e o mapa de cobertura florestal (Figura 5.33).

Figura 5.32 - Área de Influência média dos anos de 2010 a 2016 para RBA.



Fonte: Produção do autor.

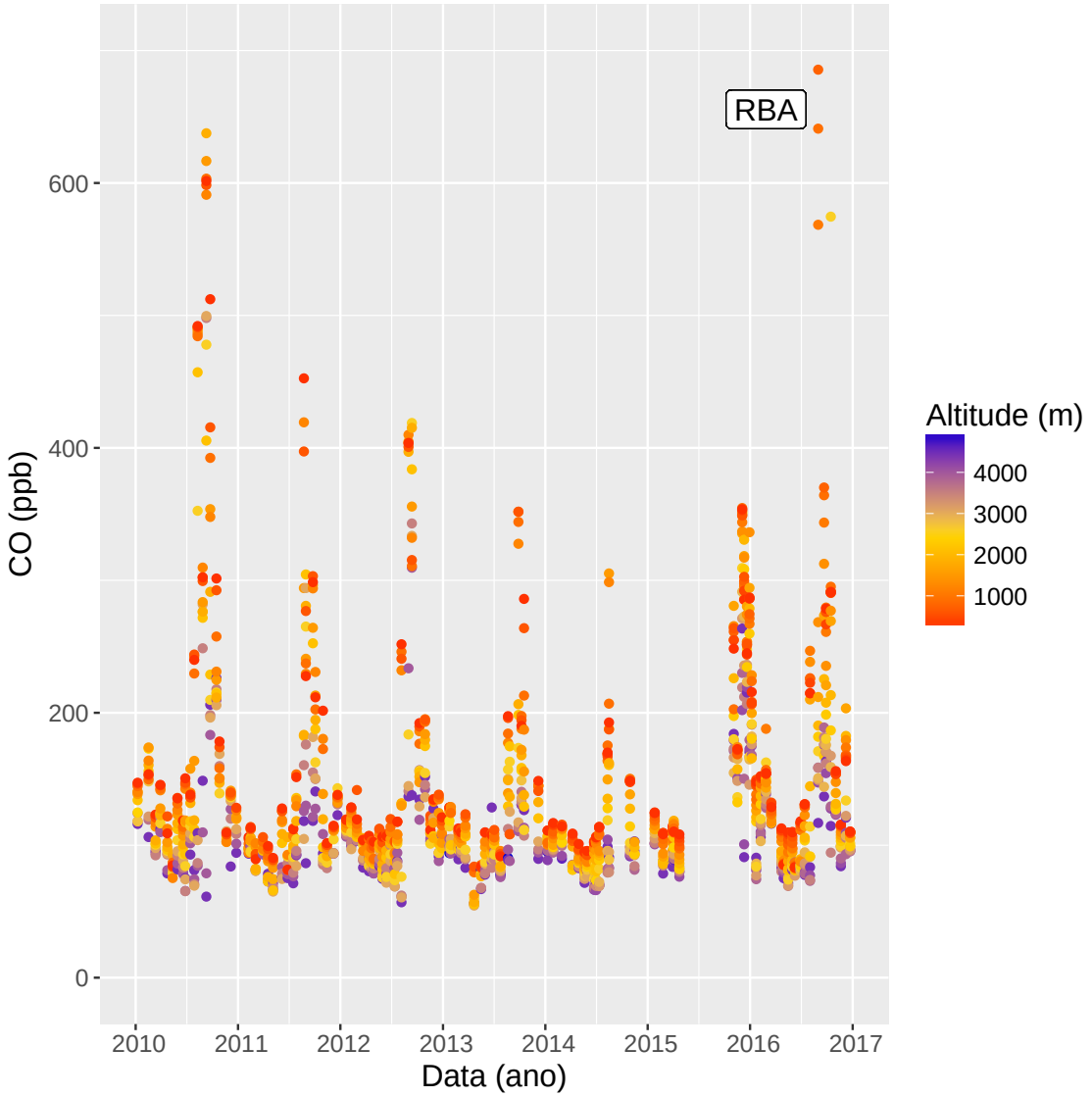
Figura 5.33 - Mapa da região Amazônica, em verde área florestal intacta, em vermelho a área desmatada 2000-2010, em cinza escuro a área desmatada antes de 2000, e nas áreas não-florestadas cinza claro.



Fonte: (ARAGÃO et al., 2014).

RBA é o local de estudo no qual foram registradas as maiores concentrações de CO dentre os locais de amostragem. Na Figura 5.34 observa-se as concentrações de CO também em escala de cores por altitude. Diferentemente de ALF, em maiores altitudes, poucos são os pontos que apresentaram concentrações acima de 200 ppb. 2010 e 2016 foram os anos nos quais foram registrados os picos de emissão, embora haja um claro comportamento de grandes emissões em todos os anos da série temporal, com perfis ultrapassando 300 ppb em 2011 e 2012 e, acima de 200 ppb em 2013, 2014 e 2015. Neste último, foram realizados perfis a partir do mês de novembro sendo quatro perfis em dezembro, quando vê-se padrões de emissão de CO comparáveis à estação seca, perpetuando até fevereiro de 2016.

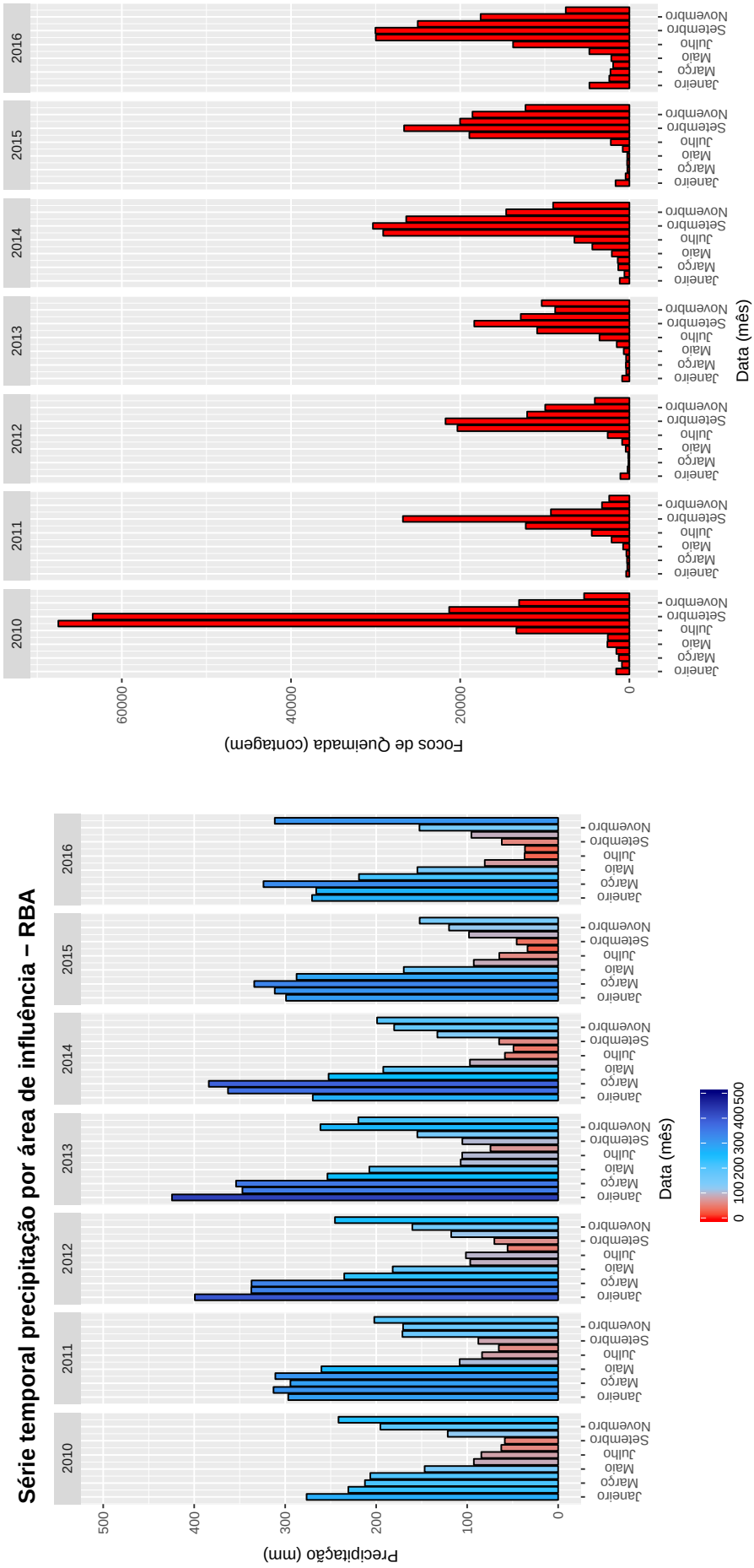
Figura 5.34 - Série temporal das concentrações de CO no local de amostragem RBA apresentado em escala de cores por altitude de coleta.



Fonte: Produção do autor.

Quando analisadas as concentrações em conjunto com a série temporal de precipitação para a AI anual de RBA e, também, o número de focos de queimada, (Figura 5.35) vê-se novamente uma estação seca prolongada no ano de 2015 e com pouca recuperação nos meses de janeiro e fevereiro de 2016, o que pode ter colaborado para a continuidade do processo de queimadas, quando foi registrado o pico de número de focos nos meses inicias do ano. Por outro lado, em 2011 ocorreu um início de ano chuvoso, com a estação seca perdurando entre três e quatro meses e, ainda assim ocorreram medidas com altas concentrações, concomitantemente com os meses de maior número de focos, setembro e agosto.

Figura 5.35 - Séries temporais de precipitação (esquerda) e número de focos de queimada (direita) calculados pela AI de RBA.



Fonte: Produção do autor.

É interessante salientar a expressividade do número de focos ocorridos nos meses de agosto e setembro de 2010 que, somados ultrapassam o número de 130 mil focos de queimada, valor este superior à contagem de focos anuais de 2011 a 2013. 2016 foi o segundo ano com a maior contagem de focos de queimada cujo o valor foi de 142 mil focos, desta forma, apesar de não ter ocorrido queimadas concentradas em poucos meses, o que viu-se foi uma distribuição destas ao longo do ano.

Todas estas prerrogativas contribuíram para que fossem encontrados 13 perfis com características de emissão de queima de biomassa (Tabela 5.3). Destes, 4 foram determinados em 2010 e, nos quatro perfis executados em dezembro de 2015, foram encontrados os padrões característicos de pluma. No mês de agosto de 2011, cujo pico de focos de queimada ocorreu, foram determinados dois perfis e, no restantes dos anos, foram encontrados apenas um perfil em cada.

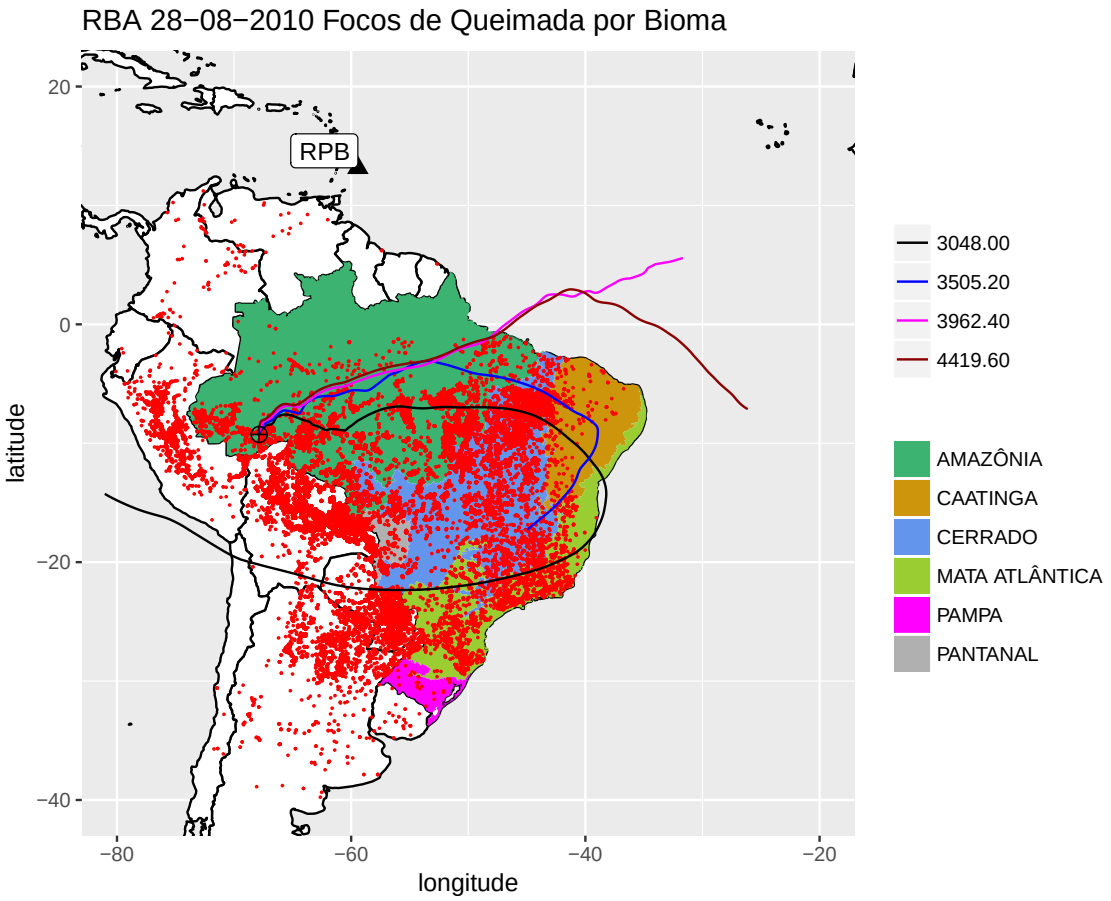
Novamente as maiores razões foram encontradas no mês de agosto, coincidentes também com o pico de número de focos de queimada e em uma época a qual a estação seca ainda não se mostrava severa, o que pode estar relacionada aos estágios de emissão do fogo conforme citado por ANDREAE et al., 2012, quando o combustível encontra-se úmido, fazendo uma queima ineficiente e com maior emissão de CO.

Tabela 5.3 - Perfis os quais foram utilizados para a determinação da razão $CO:CO_2$ em RBA. Na tabela vê-se a data dos perfis, o coeficiente de correlação, a razão $CO:CO_2$ e o desvio padrão relacionado à cada perfil.

Data	R2	CO:CO2	SD
10/08/10	0.84	117.64	20.90
28/08/10	0.91	127.22	27.68
10/09/10	0.88	47.57	7.80
24/09/10	0.81	31.43	6.18
24/08/11	0.77	94.20	36.06
31/08/11	0.89	66.61	10.72
12/09/12	0.90	90.64	13.40
16/08/14	0.77	87.92	33.75
04/12/15	1.00	84.83	2.06
11/12/15	0.86	41.53	16.58
21/12/15	0.99	36.81	4.33
30/12/15	0.93	65.02	12.81
31/08/16	0.97	54.01	4.50

Outro importante fator para estas razões $CO:CO_2$ em agosto de 2010, foi a presença de grande número de focos de queimada próximos ao local de amostragem e, também, no bioma Amazônia em regiões com a presença de floresta, como vê-se na Figura 5.36. FEREK et al., 1998 realizou medidas incluindo regiões próximas à cidade de Porto Velho, 3 perfis, separando emissões de florestas em chamas e de fogo latente em processo de esfumaçamento ("*smoldering*"). A razão $CO:CO_2$ encontrada neste estudo foi igual a 103 ± 8 ppb/ppm no cenário de florestas em chamas.

Figura 5.36 - Trajetórias utilizadas para o cálculo da razão $CO:CO_2$, focos de queimada ocorridos no período de duração destas até o continente (pontos em vermelho) distribuídos pelos biomas brasileiros em agosto de 2010.

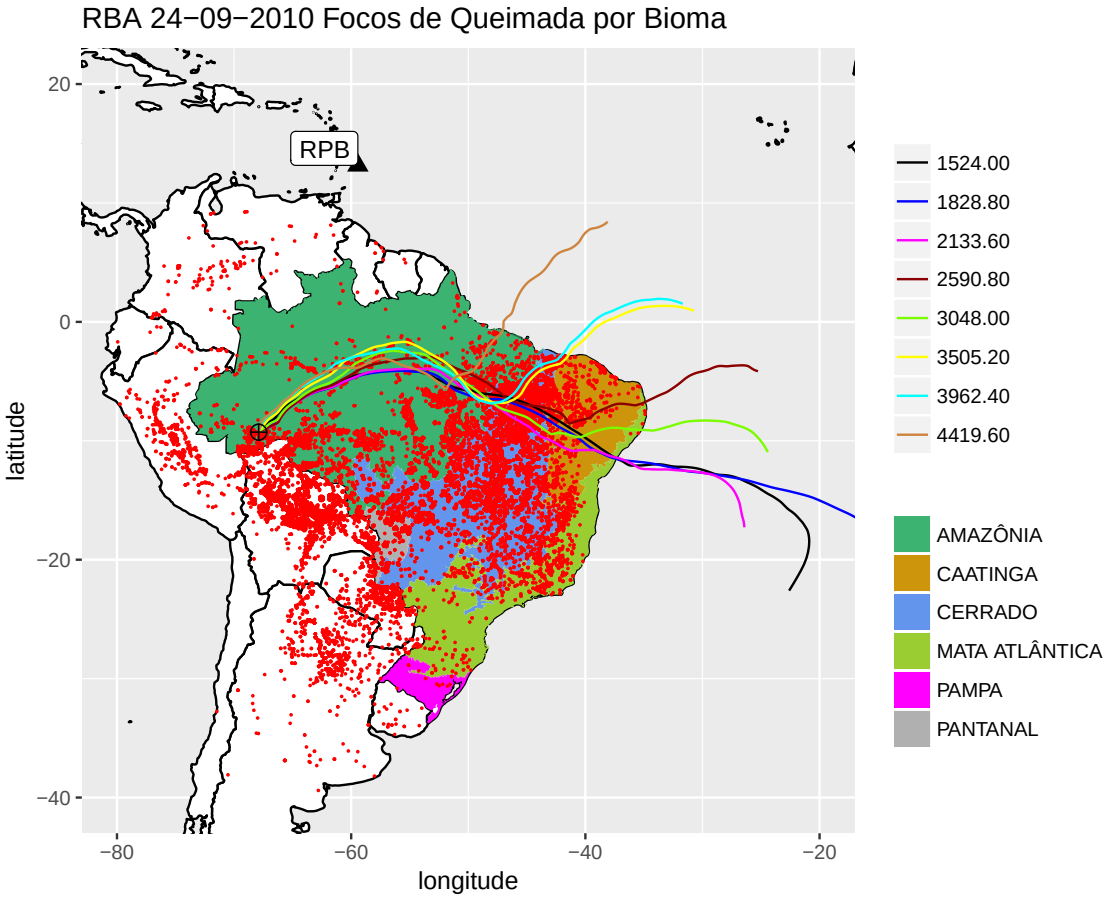


Fonte: Produção do autor.

No mês de setembro de 2010, apesar de ainda registrar números impressionantes de focos de queimada, estes ocorreram em sua maioria na região do Cerrado, trazendo as informações desta queima aos perfis realizados, como vê-se na Figura 5.37. Desta forma, em maiores altitudes, a concentração de CO já estava

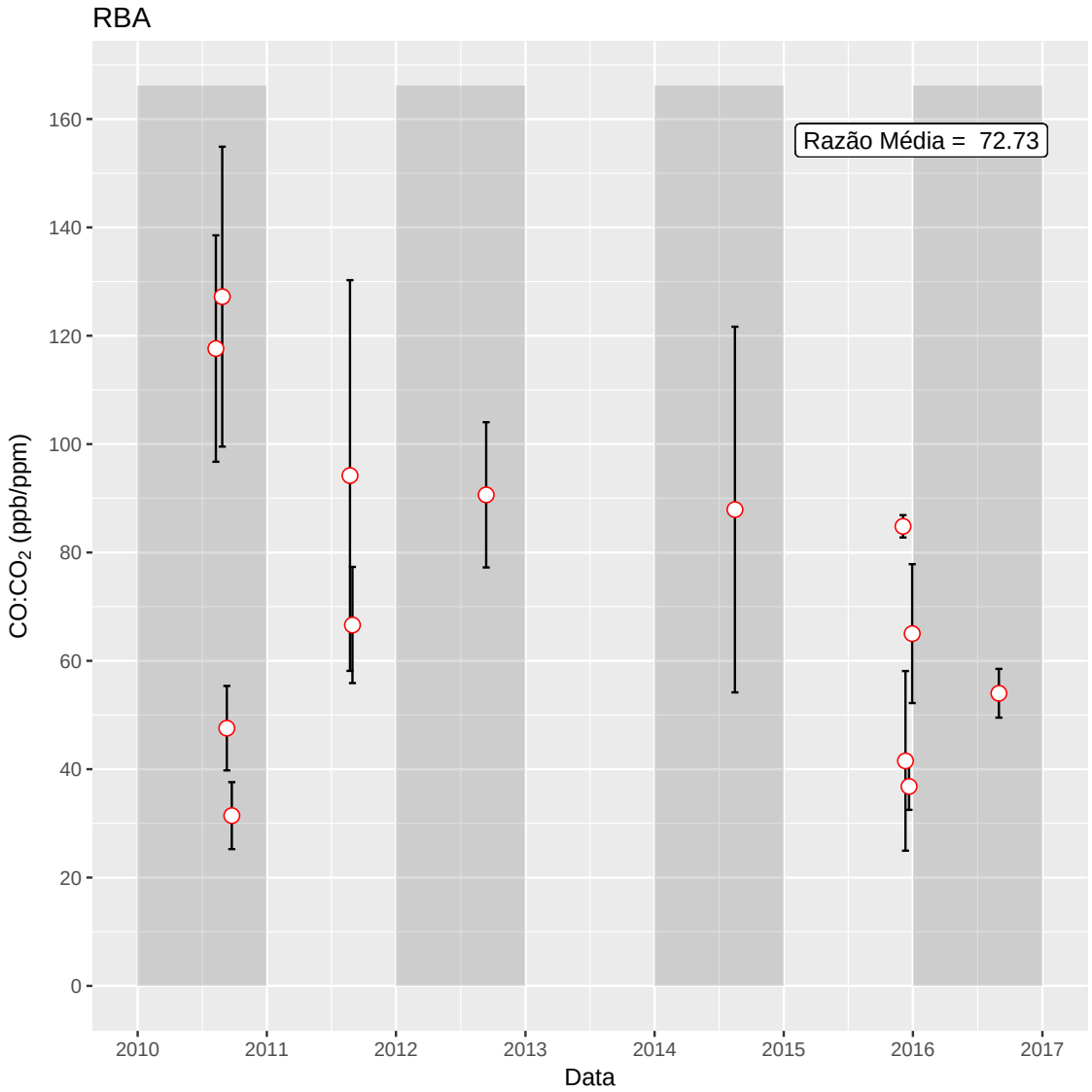
elevada com o carreamento destas emissões. Neste caso específico com o dobro da concentração em relação ao BKG, diminuindo assim, a amplitude da pluma registrada e gerando uma menor razão $CO:CO_2$ neste mês. Na Figura 5.38 pode-se observar as diferenças nas amplitudes das plumas, juntamente com os resultados das razões $CO:CO_2$ encontradas em RBA nos anos de estudo.

Figura 5.37 - Trajetórias utilizadas para o cálculo da razão $CO:CO_2$, focos de queimada ocorridos no período de duração destas até o continente (pontos em vermelho) distribuídos pelos biomas brasileiros em setembro de 2010.



Fonte: Produção do autor.

Figura 5.38 - Distribuição gráfica dos resultados de $CO:CO_2$ para RBA.



Fonte: Produção do autor.

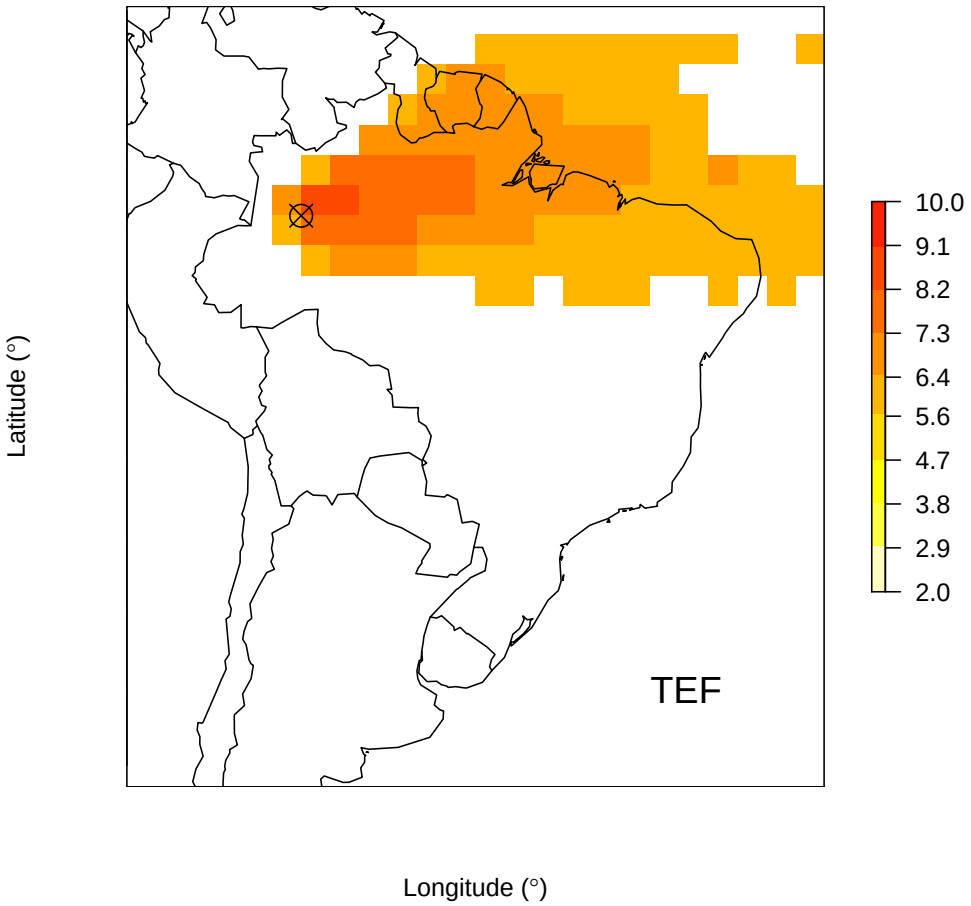
Esta amplitude do desvio padrão é uma diferente característica encontrada em RBA com relação a ALF, na maioria dos perfis vê-se grandes plumas caracterizadas pelo aumento no desvio padrão.

Quando realizada a média das razões $CO:CO_2$ encontradas em RBA, o resultado foi de 73 $\pm$ 30 ppb/ppm, elevado em relação à ALF, pela influência da queima em florestas, no entanto não tão elevado quanto aos perfis mais influenciados pela mesma. Portanto, RBA é um local que traduz as emissões de áreas florestadas mas, também, recebe a influência das emissões ocorridas no Arco do Desflorestamento e no Cerrado.

5.5.3 Tabatinga e Tefé - TAB e TEF

Os locais de amostragem TAB, substituído por TEF quando desativado, representam as regiões com maiores densidades de floresta nativa. Esta condição fica clara quando compara-se a Figura 5.39, na qual observa-se a área de influência média de TAB e TEF, e a Figura 5.33.

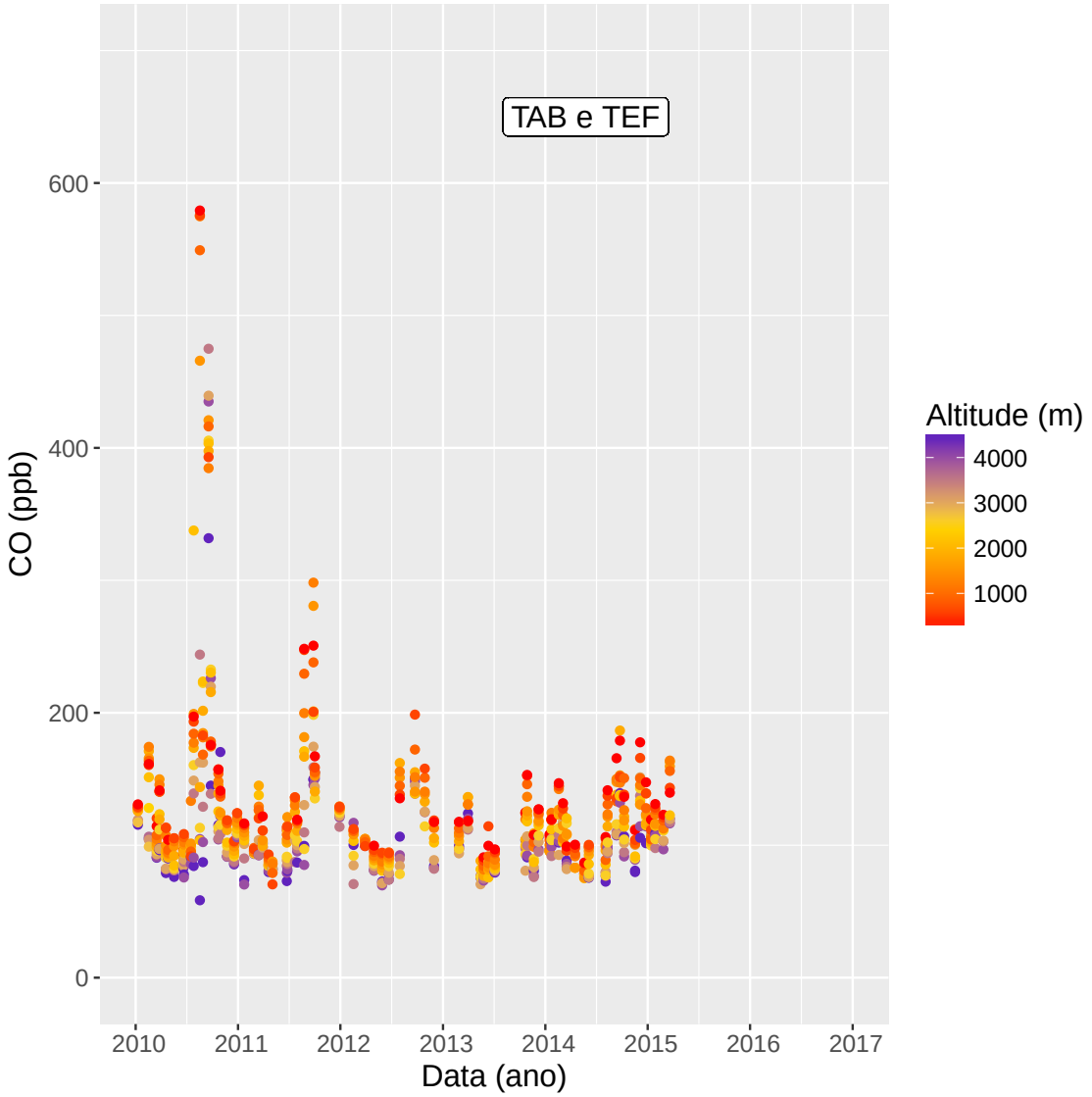
Figura 5.39 - Área de Influência média dos anos de 2010 a 2015 para TAB e TEF.



Fonte: Produção do autor.

É o local de amostragem que apresentou as menores concentrações de CO, ocorrendo os picos de emissão em 2010 e 2011 como vê-se na Figura 5.40. Nota-se também que, a partir de 2012, ocorre uma tendência de deslocamento dos picos de emissão para os meses finais dos anos, deixando de existir um claro comportamento de emissão de CO na estação seca.

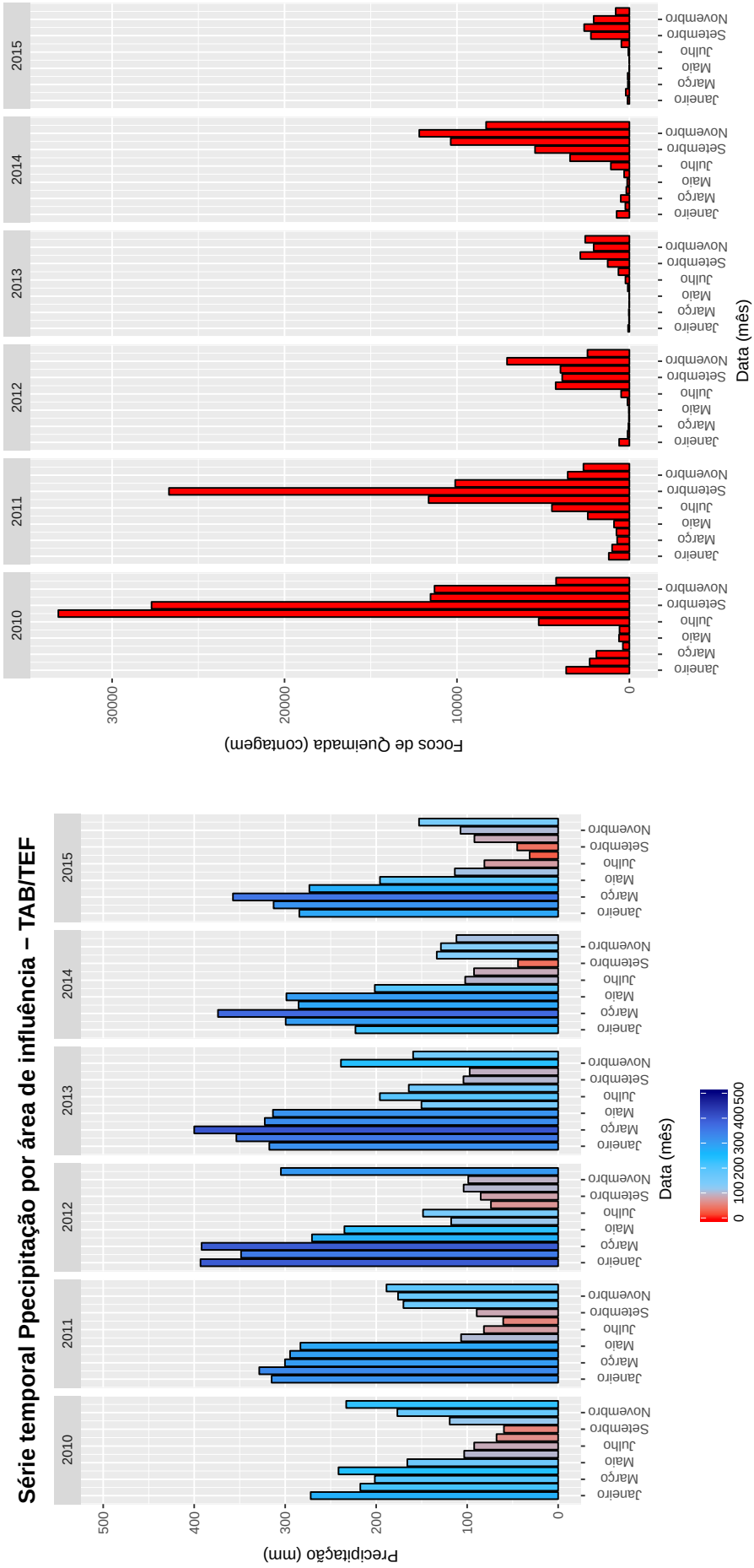
Figura 5.40 - Série temporal das concentrações de CO nos locais de amostragem TAB e TEF apresentado em escala de cores por altitude de coleta.



Fonte: Produção do autor.

Este deslocamento se confirma quando vê-se os picos de número de focos de queimada também deslocados. Na Figura 5.41 apresentam-se as séries temporais de precipitação e focos de queimada para a área de influência de TAB e TEF. A partir de 2012 os meses finais do ano apresentaram baixos índices pluviométricos, alguns inclusive ficando abaixo dos 100 mm de precipitação, salvo o ano de 2013 que, assim como nos dados de precipitação referentes à toda Bacia, foi um ano altamente chuvoso e com baixos índices de focos de queimada. Em 2012 e 2014, os picos de focos de queimada ocorreram no mês de novembro, novamente coincidentes com as emissões de CO.

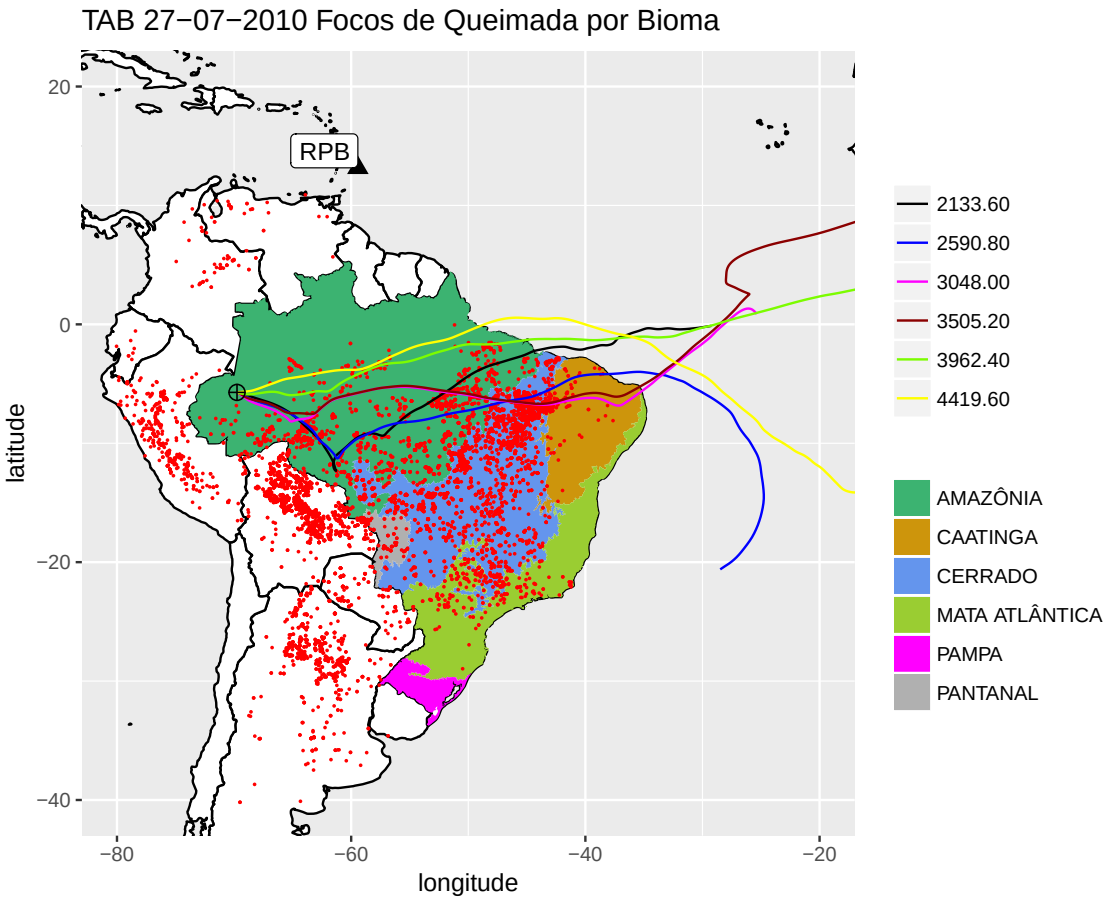
Figura 5.41 - Séries temporais de precipitação (esquerda) e número de focos de queimada (direita) calculados pela AI de TAB e TEF.



Fonte: Produção do autor.

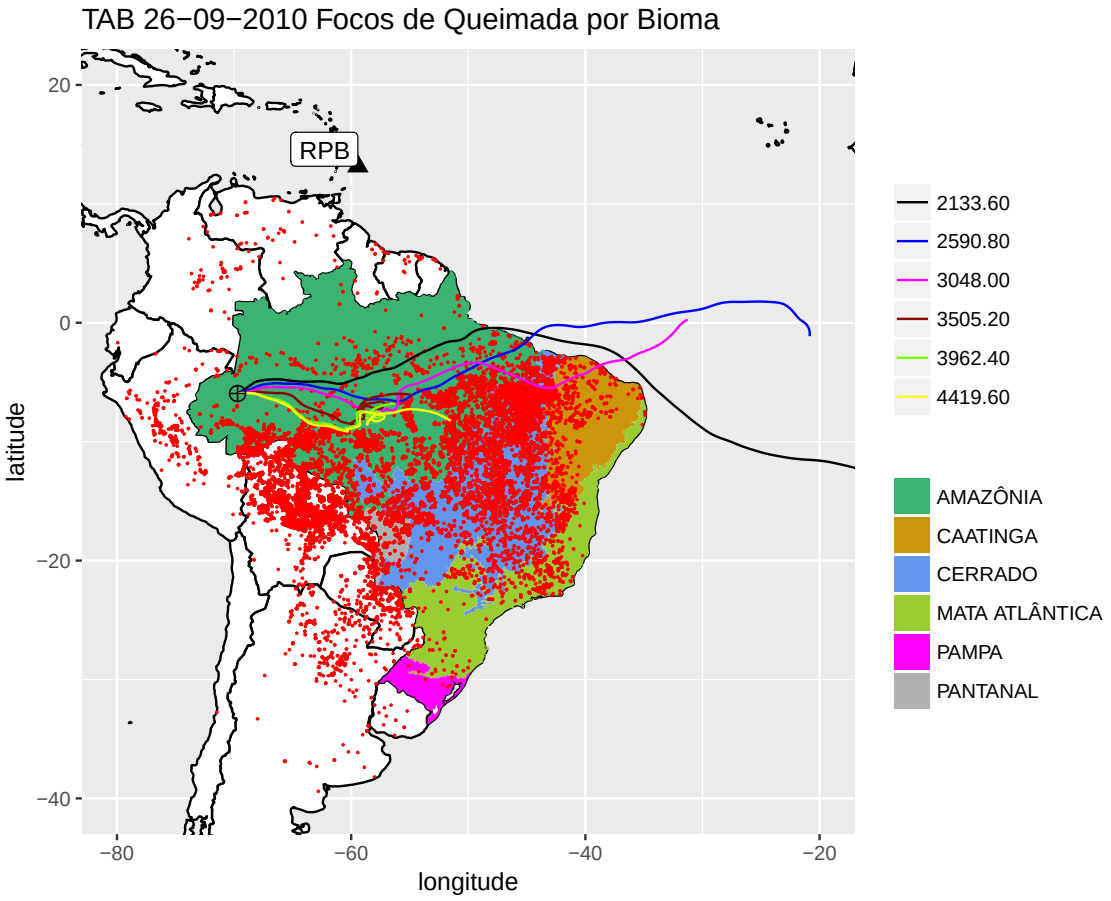
Com relação às razões $CO:CO_2$ foram encontrados três perfis de avião com características de plumas oriundas da queima de biomassa sendo dois perfis no ano de 2010 e um perfil em 2014. Nas Figuras 5.42, 5.43 e 5.44 pode-se observar as trajetórias dos perfis utilizados, juntamente com os valores das razões, desvio padrão e coeficiente de correlação.

Figura 5.42 - Trajetórias utilizadas para o cálculo da razão $CO:CO_2$, focos de queimada ocorridos no período de duração destas até o continentes (pontos em vermelho) distribuídos pelos biomas brasileiros em TAB na data 27/07/2010. Resultados deste: R^2 = 0,93 / $CO:CO_2$ = 124,5 ppb/ppm / SD = 16,7



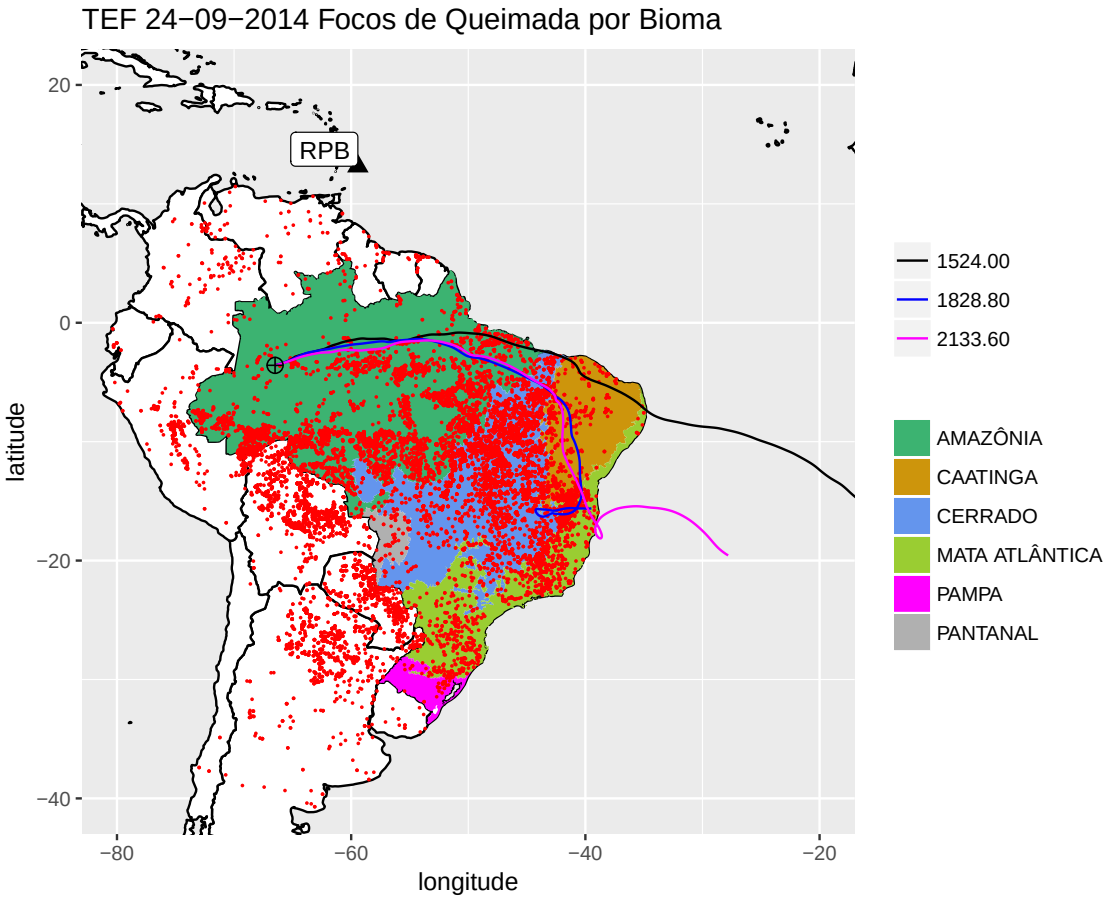
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.43 - Trajetórias utilizadas para o cálculo da razão $CO:CO_2$, focos de queimada ocorridos no período de duração destas até o continentes (pontos em vermelho) distribuídos pelos biomas brasileiros em TAB na data 26/09/2010. Resultados deste: R^2 = 0,86 / $CO:CO_2$ = 74,5 ppb/ppm / SD = 14,7



Fonte: Produção do autor.

Figura 5.44 - Trajetórias utilizadas para o cálculo da razão $CO:CO_2$, focos de queimada ocorridos no período de duração destas até o continentes (pontos em vermelho) distribuídos pelos biomas brasileiros em TEF na data 24/09/2014. Resultados deste: R^2 = 0,99 / $CO:CO_2$ = 72,2 ppb/ppm / SD = 4



Fonte: Produção do autor.

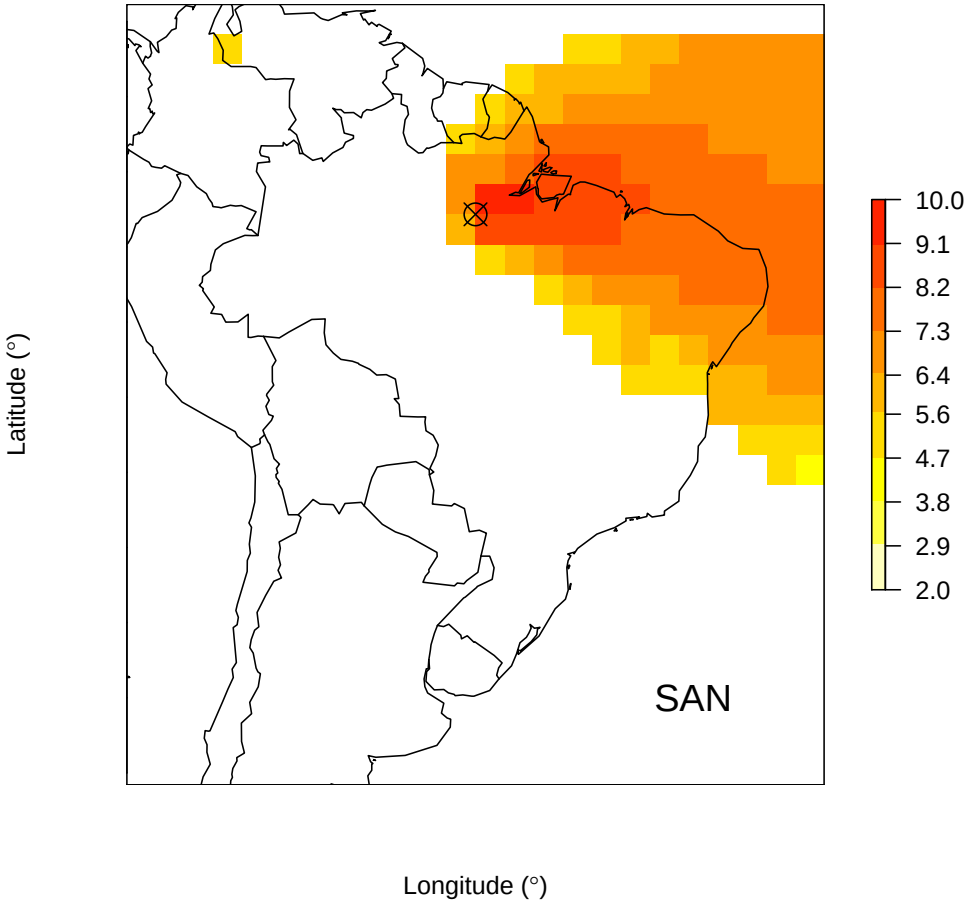
Nestas, fica evidente a grande influência do bioma Amazônia nas amostras as quais foram utilizadas para o cálculo da razão, gerando um valor médio da razão $CO:CO_2$ de 90 $\pm$ 12 ppb/ppm. Valor este próximo à publicações nas quais foram consideradas as emissões de áreas florestadas como o já citado FEREK et al., 1998 e, também, o estudo de ANDREAE et al., 1988, o qual determinou uma razão $CO:CO_2$ de 85 $\pm$ 4 ppb/ppm em regiões florestadas da Amazônia central.

5.5.4 Santarém - SAN

Oposto aos locais TAB e TEF, SAN representa uma região que há tempos sofre com o desmatamento, iniciado a partir de meados de 1970, sofrendo com a criação de pastagens, extração de madeira e agricultura (FELIPPE, 2010). Possui uma área de influência muito bem delimitada, com pouca variação dentre os anos

de estudo, sofrendo grande influência das regiões próximas ao local de amostragem mas, também, englobando a região nordeste do país, como vê-se na Figura 5.45. Desta forma, recebe influências da porção Norte do bioma Cerrado e, praticamente, de toda a Caatinga.

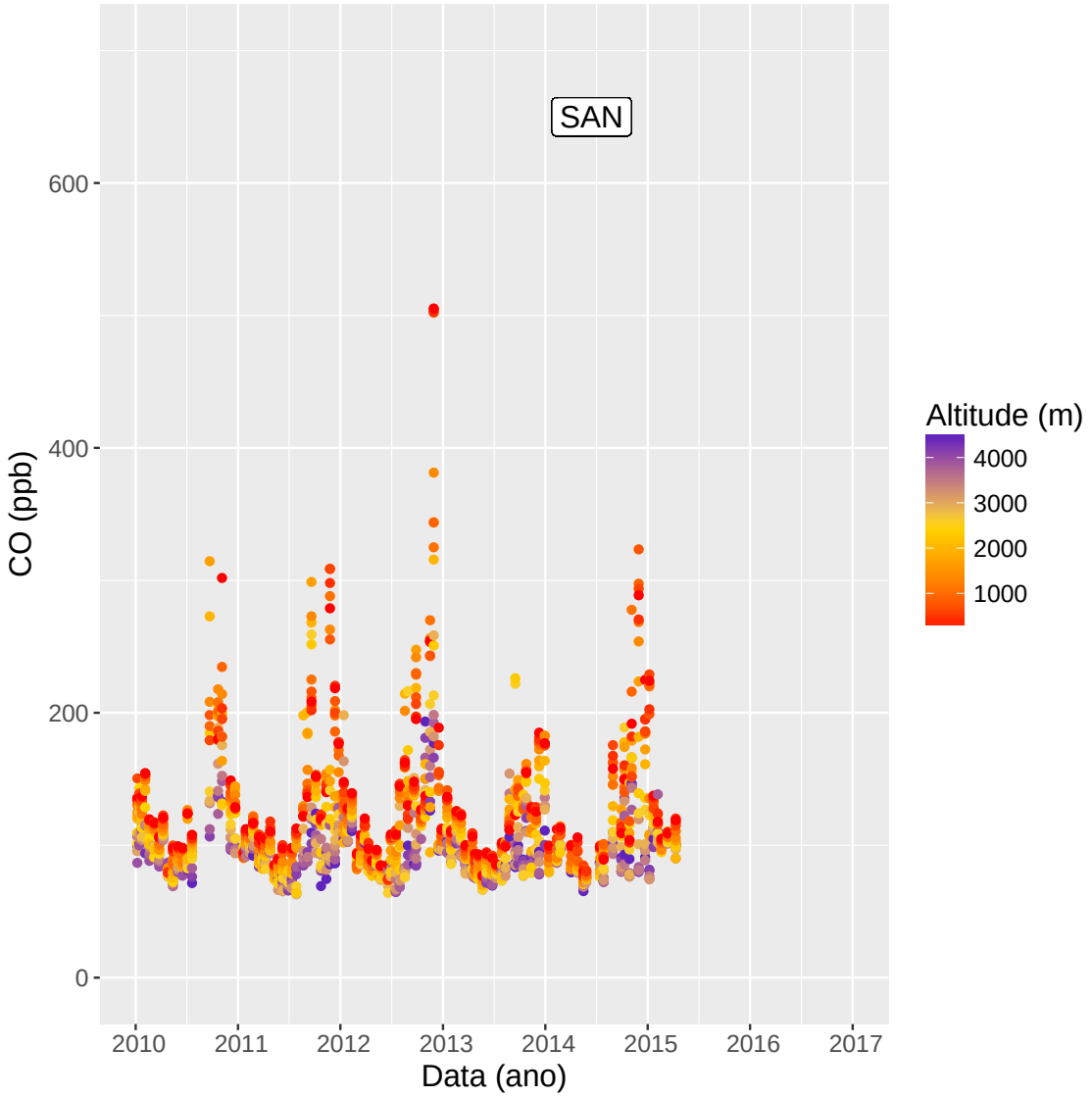
Figura 5.45 - Área de Influência média dos anos de 2010 a 2015 para SAN.



Fonte: Produção do autor.

Possui um regime diferenciado de emissões de CO, onde vê-se os meses de janeiro e fevereiro com aumentos de emissão, uma redução até o mês de agosto, quando novamente a concentração de CO é elevada, conforme observa-se na Figura 5.46.

Figura 5.46 - Série temporal das concentrações de CO no local de amostragem SAN apresentado em escala de cores por altitude de coleta.

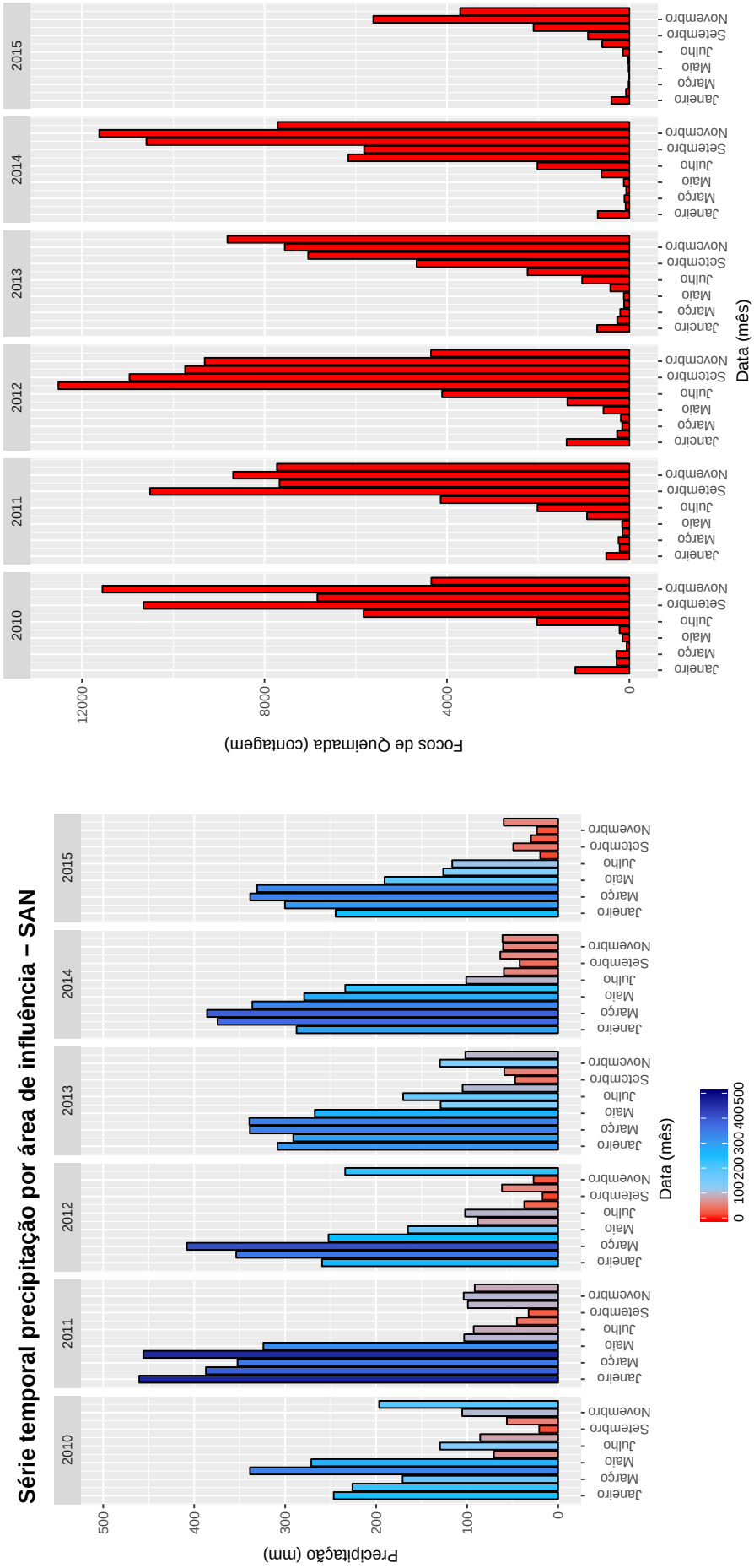


Fonte: Produção do autor.

É interessante observar as emissões de CO juntamente com a pluviometria e focos de queimada (Figura 5.47). Em todos os anos o mês de janeiro apresentou-se chuvoso, no entanto, juntamente com as emissões de CO, vê-se a existência um grande número de focos de queimada para períodos chuvosos, o que pode ser uma consequência dos meses finais dos anos anteriores, os quais apresentaram baixos índices de pluviometria.

De forma geral, os meses de janeiro a maio são chuvosos, decrescendo os índices de precipitação a partir de junho e, o oposto ocorrendo com o número de focos de queimada, apresentando picos entre os meses de agosto à novembro.

Figura 5.47 - Séries temporais de precipitação (esquerda) e número de focos de queimada (direita) calculados pela AI de SAN.



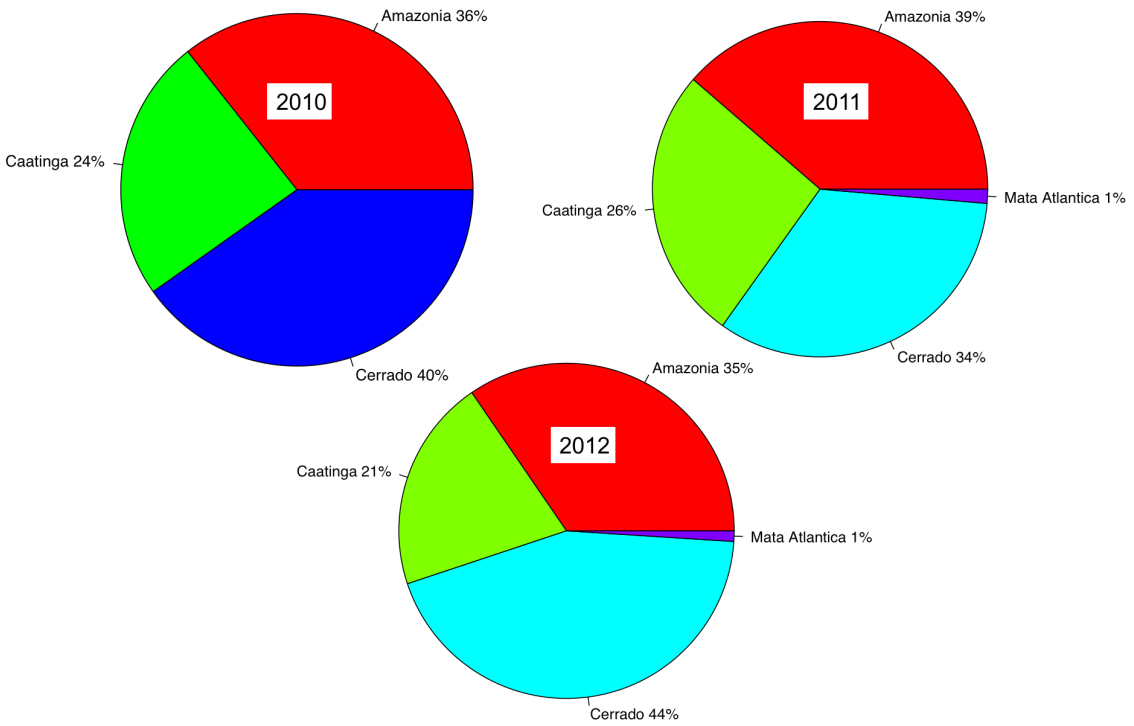
Fonte: Produção do autor.

Em SAN foram encontrados oito perfis com comportamentos de queima de biomassa nos anos de 2010, 2011 e 2012. Na Tabela 5.4 vê-se os resultados. Nestes, nota-se que são números de razão $CO:CO_2$ inferiores aos outros locais de amostragem. Quando analisa-se o bioma submetido à queima nos anos de 2010 a 2012 (Figura 5.48), observa-se uma representatividade mista entre os biomas Amazônia, Cerrado e Caatinga.

Tabela 5.4 - Perfis os quais foram utilizados para a determinação da razão $CO:CO_2$ em SAN. Na tabela vê-se a data dos perfis, o coeficiente de correlação, a razão $CO:CO_2$ e o desvio padrão relacionado à cada perfil.

Data	R2	CO:CO2	SD
22/09/10	0.90	52.39	12.11
22/08/11	0.94	46.21	4.79
06/09/11	0.91	33.74	3.84
20/09/11	0.97	43.00	2.97
18/08/12	0.82	48.49	8.53
29/08/12	0.88	36.90	6.12
16/11/12	0.78	42.00	16.55
29/11/12	0.71	64.00	27.74

Figura 5.48 - Relação de focos de queimada e tipo de bioma distribuídos pela AI anual de SAN.

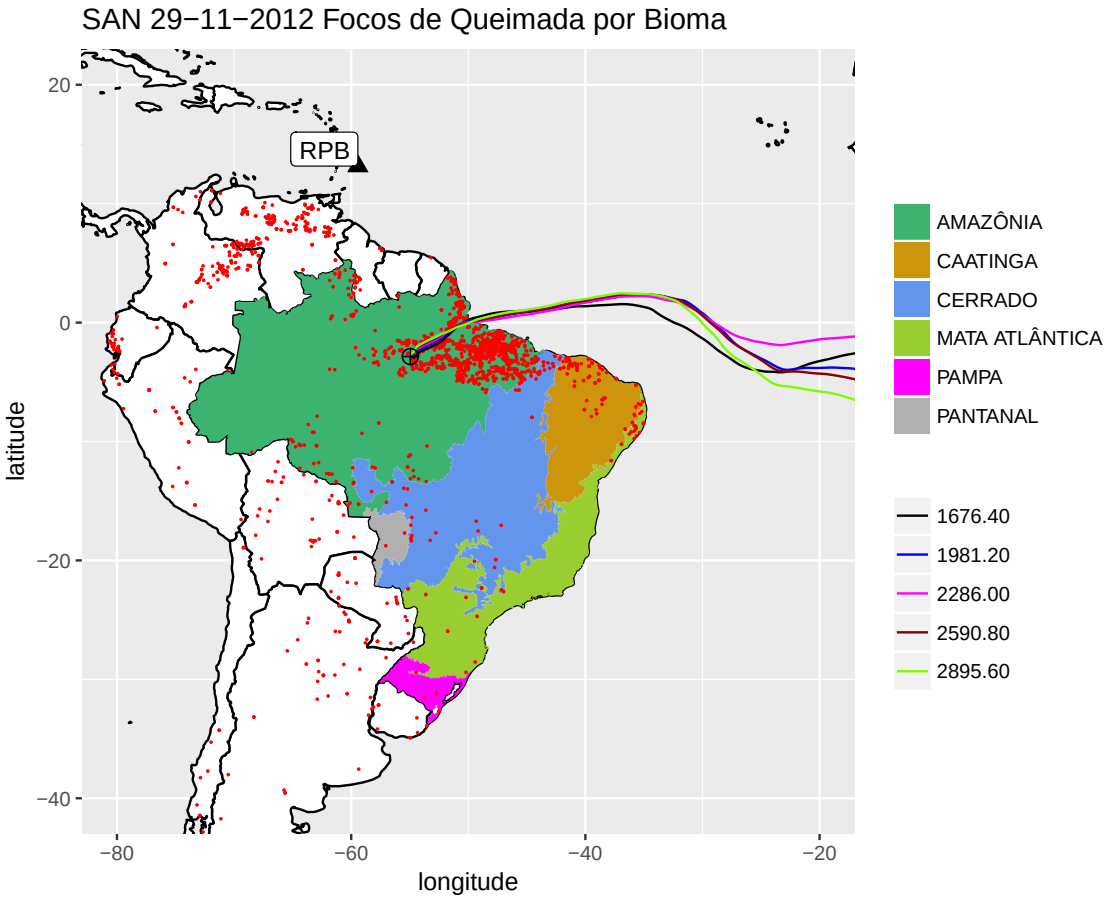


Fonte: Produção do autor.

A influência dos biomas Cerrado e Caatinga colaboraram para a redução dos valores da razão, pela melhor eficiência da queima e, consequentemente, menor emissão de CO. A razão CO:CO_2 média calculada para SAN foi de 46 $\pm$ 9 ppb/ppm.

Em estudos anteriores, GATTI et al., 2010, apresentou valor para a razão CO:CO_2 neste mesmo local de amostragem, no período compreendido entre o ano 2000 até janeiro de 2010, igual a 74 $\pm$ 20 ppb/ppm, destacando, também, a influência de não apenas florestas tropicais, mas também florestas degradadas, pastagens, terras agrícolas, terras arbustivas e savanas. Este que é um resultado muito superior ao encontrado no estudo atual; apenas o perfil realizado em 29/11/2012 se enquadra dentro do resultado apresentado por Gatti com a margem de erro. Curiosamente, este foi o único perfil que apresentou influência somente de focos de queimada presentes no bioma Amazônia nas amostras filtradas para o cálculo da razão como vê-se na Figura 5.49. A grande maioria dos focos de queimada ocorreram dentro do bioma Amazônia e as trajetórias percorreram somente a porção ao Norte do Nordeste brasileiro, entre os Estados Amapá e Pará, regiões do bioma Amazônia e, portanto, não sofrendo influências de outros biomas.

Figura 5.49 - Trajetórias utilizadas para o cálculo da razão $CO:CO_2$, focos de queimada ocorridos no período de duração destas até o continentes (pontos em vermelho) distribuídos pelos biomas brasileiros em SAN na data 29/11/2014.



Fonte: Produção do autor.

No estudo apresentado por GATTI et al.,2010, não são citadas as condições de queima quando a amostragem dos perfis utilizados para o cálculo da razão $CO:CO_2$, no entanto é comentado que variações da razão $CO:CO_2$ para este local de amostragem não implicam em grandes alterações nos cálculos finais de fluxo de emissão oriundos da queima de biomassa.

5.5.5 Resultados compilados de CO:CO_2 para a Amazônia

Foi encontrada significativa variação da razão CO:CO_2 entre os locais de amostragem. Na literatura, esta variação também é reportada. ANDREAE et al., 2012, realizou uma compilação de resultados incluindo os estudos de GUYON et al., 2005, KUHN et al., 2010, ANDREAE et al., 1998, FEREK et al., 1998 e WARD et al., 1991, resultados estes atualizados e incluídos conforme vê-se na Tabela 5.5. Todos os estudos apresentados têm em comum a realização de medidas em perfis verticais, seja em medidas em frascos, com monitores "*on-line*" ou realização de campanhas.

Tabela 5.5 - Resultados das razões CO:CO_2 (ppb/ppm) em estudos realizados com medidas em avião na Bacia Amzônica.

Região	Vegetação	CO:CO2	Referência
Leste e Amazônia Central	Principalmente Florestas	66 ± 23	Andrea et al., 2012
Leste da Bacia Amazônica	Florestas e pastos	74 ± 20	Gatti et al., 2010
Sul da Amazônia	Florestas e pastos	61 ± 17	Guyon et al., 2005
Região de Manaus	Desconhecida	77 ± 40	Kuhn et., 2010
Amazônia Central	Principalmente Florestas	85 ± 4	Andrea et al., 1988
Amazônia	Florestas	103 ± 8	Ferek et al., 1998
Sul da Amazônia	Florestas	85 ± 29	Ward et al., 1991
Bacia Amazônica	Florestas	72,8 ± 34,2	Gatti et al., 2014

Fonte: Adaptado e atualizado de (ANDREAE et al., 2012).

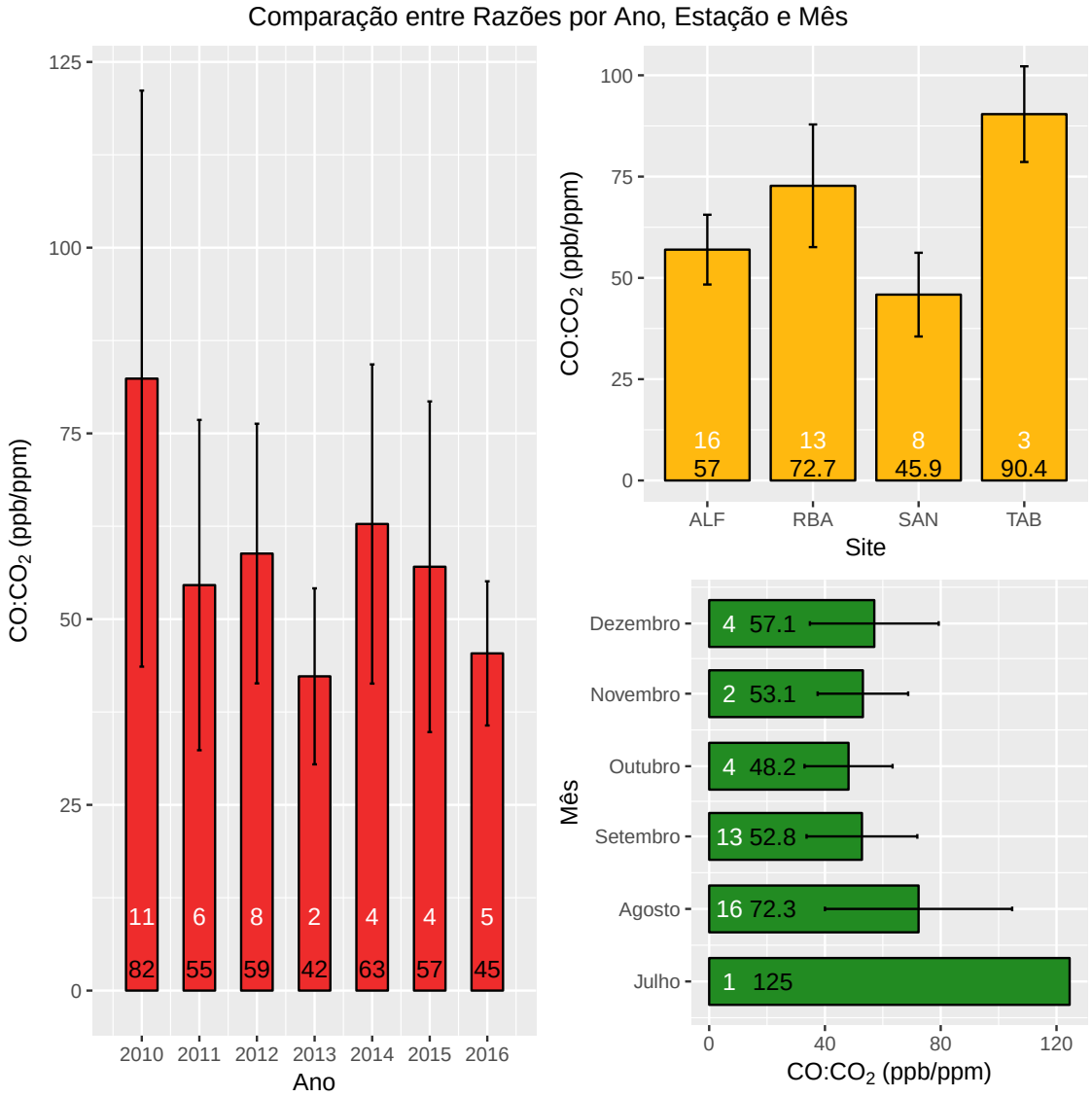
Como observa-se, ocorre uma grande variação entre os resultados dos estudos, principalmente por não representarem a mesma região, pela variação anual entre estes e, também, deve-se considerar o horário de coleta das amostras.

No início do dia, as concentrações de CO_2 em altitudes abaixo de 100 metros são fortemente elevadas devido às emissões acumuladas da respiração biológica ocorridas à noite. A fumaça emitida neste período contém excesso de CO principalmente do fogo, no entanto, o CO_2 é elevado tanto pelas emissões de queimadas quanto pela respiração. Quando esta fumaça é elevada como uma pluma até a troposfera livre, e as concentrações de CO e CO_2 são utilizadas para calcular a razão, o CO_2 pirogênico na pluma é superestimado (devido à presença de uma quantidade desconhecida de CO_2) e, portanto, a razão é subestimada. Assim, apenas plumas de fogo amostradas em torno do meio dia, quando a atmosfera é bem misturada até a altitude de amostragem, e com fortes anomalias de CO_2 pirogênico, são adequadas para medições da razão de emissão (ANDREAE et al., 2012).

Outra importante variação é a forma de cálculo da razão. KUHN et al., 2010 e ANDREAE et al., 2012 utilizaram a regressão algorítmica para a determinação dos resultados e, os outros estudos, assim como este, utilizaram a regressão linear simples.

Todas estas variáveis fazem com que a determinação e a comparação dos resultados para uma área tão vasta quanto a da Amazônia, não seja tarefa fácil. Analisando os resultados da Amazônia como um todo apresentados neste estudo, também vê-se grande variação. Na Figura 5.50, demonstram-se os resultados das razões $CO:CO_2$ separados de forma anual, mensal e por local de amostragem.

Figura 5.50 - Compilação dos resultados de $CO:CO_2$ comparando as razões por ano (barras em vermelho), por local de amostragem (barras em amarelo) e por mês (barras em verde).



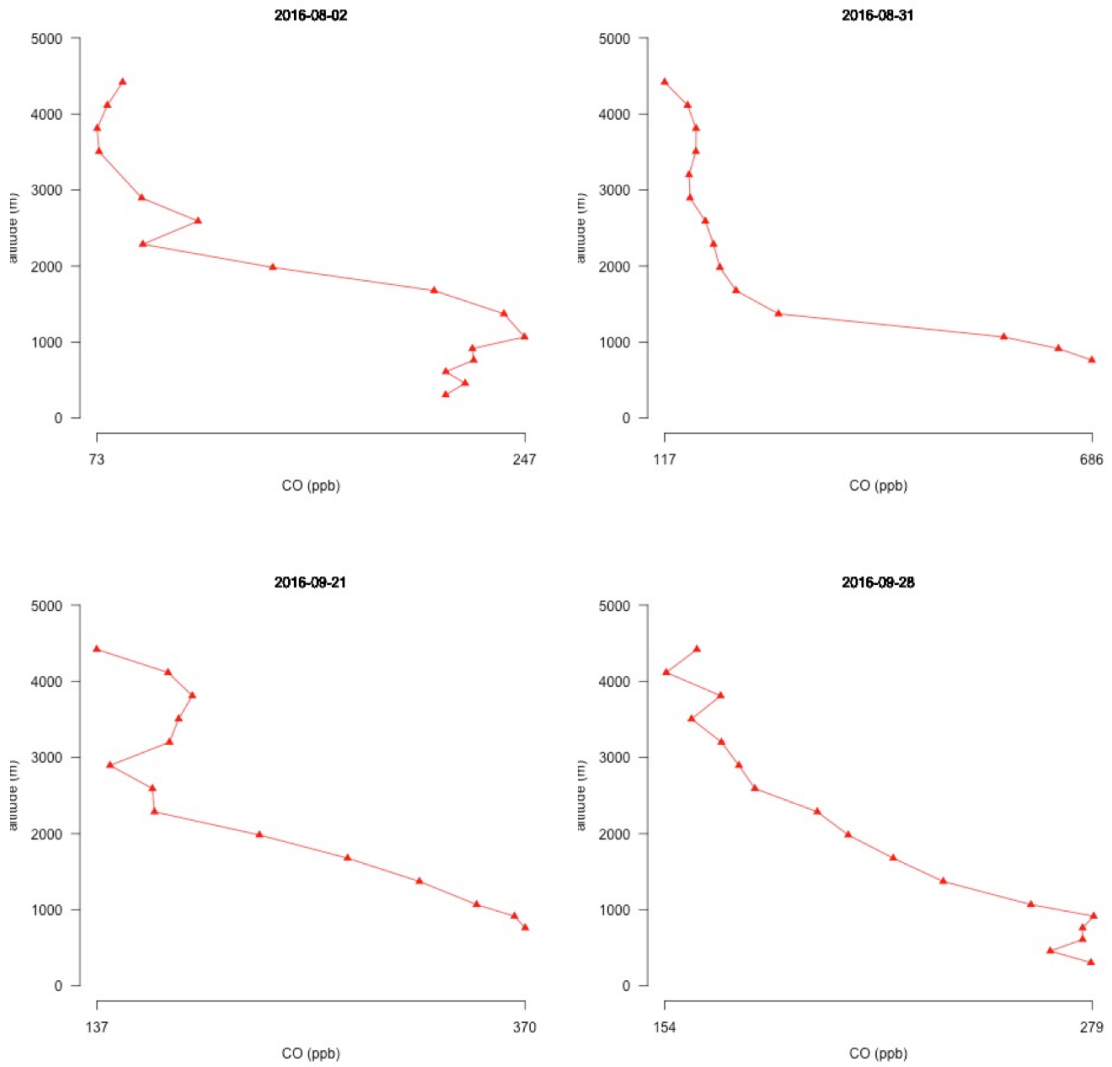
Fonte: Produção do autor.

Nesta, vê-se claramente a variação das razões entre os anos e os meses, não somente por local de amostragem. As maiores razões foram encontradas no ano de 2010, ano muito seco e quente, portanto mais característico de queima de biomassa e com recordes de focos de queimada nos meses de agosto e setembro, meses também cujos valores das razões $CO:CO_2$, ultrapassaram a marca dos 100 ppb/ppm, que representa os maiores valores já reportados em estudos. Por outro lado, o ano de 2013 foi um ano mais chuvoso e com o menor número de focos de queimada do período estudado e apresenta a menor razão média anual.

O ano de 2012, após 2010, foi quando foram encontrados um maior número de perfis com características de queima de biomassa, grande parte na porção Leste da Amazônia nos locais de amostragem SAN e ALF. Neste primeiro, foram encontrados os maiores valores da concentração (Figura 5.46 nesta série histórica, coincidentes com o período de maiores focos de queimada (Figura 5.47), o que contribuiu para o resultado médio anual. O oposto ocorre em 2014, quando foram registrados apenas quatro perfis com características de queima de biomassa, em grande parte representando a região Oeste da Amazônia, e como já observado, regiões que apresentam maiores valores para as razões $CO:CO_2$. Pelos dados de focos de queimada (Figura 5.20) e precipitação (Figura 5.16), acredita-se que no ano de 2015 também poderia apresentar resultados semelhantes a 2010, no entanto as medidas foram interrompidas de maio a outubro, e com o pico da queimada ocorrendo de agosto a outubro, ainda assim, nos quatro perfis realizados no mês de dezembro em RBA, foram encontradas plumas de queimada.

O ano de 2016, apresentou uma razão $CO:CO_2$ baixa, mesmo apresentando altas concentrações de CO (vide Figuras 5.27 e 5.34), sendo quatro perfis em ALF e um em RBA e, desta forma, sofrendo uma maior influência da região Leste da Amazônia. Ao analisar-se a Figura 5.51, na qual são apresentados os perfis verticais realizados em agosto e setembro de 2016 em RBA, vê-se que os picos das emissões ocorreram em altitudes inferiores a 1500 metros e, portanto, pela metodologia, ficando os picos das plumas fora dos cálculos, justamente pela possibilidade de apresentarem influências da floresta na absorção de CO_2 e, assim, colaborando para que fosse encontrado um resultado inferior da razão $CO:CO_2$ neste ano.

Figura 5.51 - Perfis realizados em RBA mostrando as altas concentrações de CO nos meses de agosto e setembro abaixo do limite de 1500 metros de altitude.



Fonte: Produção do autor.

Observando-se as razões separadas mensalmente, é interessante analisar como o comportamento das razões se mostra invertido com relação à precipitação. Em meses com maiores precipitações e com disponibilidade de água, as razões são maiores. Estas vão diminuindo até o pico da estação seca, que ocorre entre os meses de agosto e setembro, e voltam a aumentar conforme o início da estação chuvosa. Portanto meses com baixa disponibilidade de água, tendem a possuir razões CO:CO_2 menores. Claro que neste aspecto tem-se de considerar não somente os índices de precipitação mas, também, a disponibilidade de água no solo.

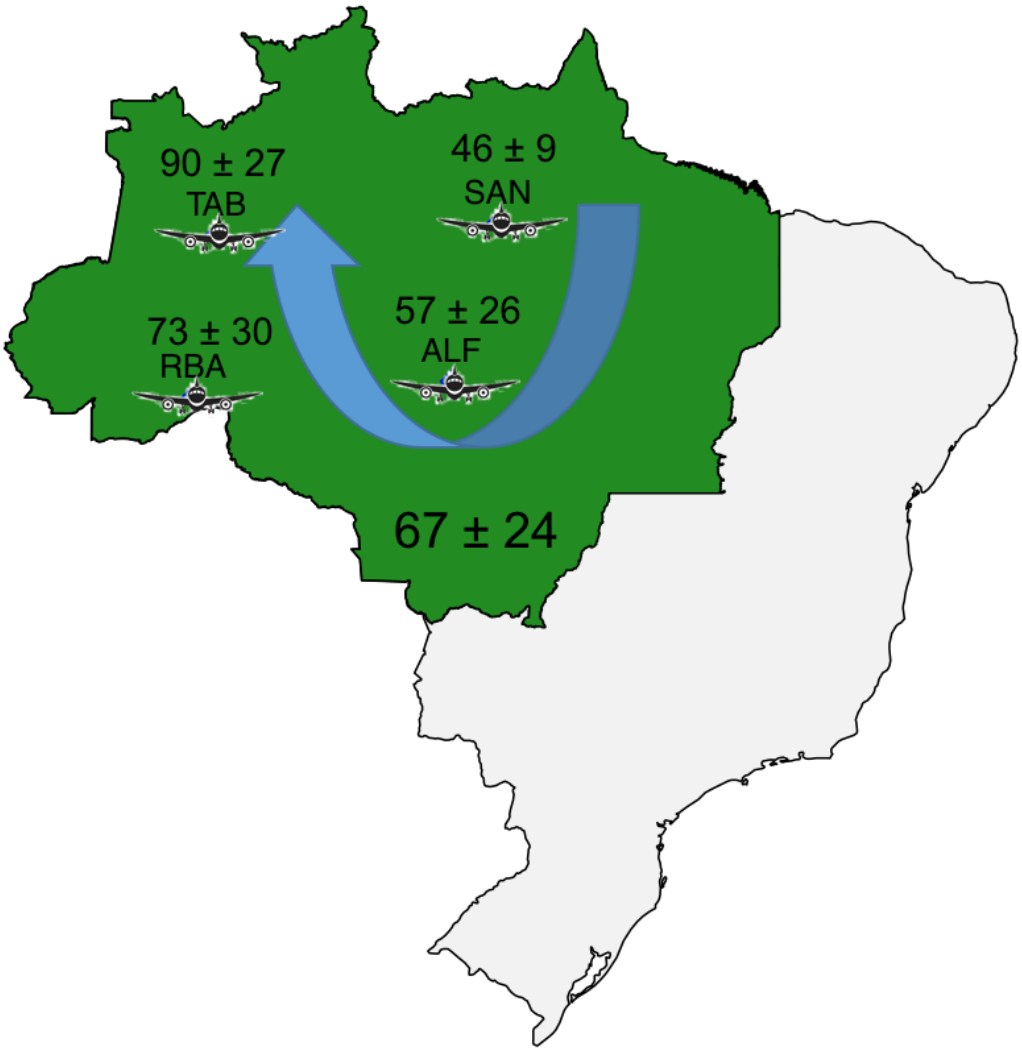
Nos meses de agosto e setembro foram determinadas 29 das 40 razões $CO:CO_2$ encontradas neste estudo. Agosto, que é um mês mais próximo à estação chuvosa e com picos de número de focos de queimada, apresenta uma razão maior do que setembro.

Mesmo representando mais de 70% dos resultados, em um estudo no qual são apresentadas grandes variações, a quantificação da razão em todos os meses da estação seca, se mostra uma informação importante para a melhor definição de um número da razão $CO:CO_2$ para a Amazônia, gerando maior confiabilidade para sua aplicação em outros estudos. Este procedimento é destacado também em ANDREAE et al., 2012, que cita inclusive que, em teoria, é possível obter valores de razão $CO:CO_2$ derivada de apenas uma medida de pluma, no entanto, devido às grandes variações encontradas no processo, é essencial a realização de mais experimentos para a determinação de um comportamento mediano para a Amazônia.

Na Figura 5.52 apresenta-se o resultado final das razões $CO:CO_2$ para a Amazônia. De modo geral, observa-se uma forma semi-circular, iniciando na parte Nordeste em SAN com os menores valores da razão e, em sentido horário, até TAB com os maiores valores. Para a Amazônia foi definida uma razão média a 67 $\pm$ 24 ppb/ppm. Este é um valor muito próximo ao discutido em ANDREAE et al., 2012 (66 $\pm$ 23 ppb/ppm) e a GUYON et al., 2005 (61 $\pm$ 17 ppb/ppm). No entanto o estudo mais utilizado para a determinação da razão $CO:CO_2$, com mais de 2000 citações é o de ANDREAE; MERLET, 2001 no qual foram realizadas medidas de fatores de emissão relacionados ao tipo de material exposto à queima. Para florestas tropicais, quando transformados os valores para razão de emissão, o número determinado foi de 104 $\pm$ 20 ppb/ppm para valores de massa seca.

Neste mesmo estudo, ANDREAE; MERLET, 2001, determinam a razão de emissão para Savanas, 65 $\pm$ 20 ppb/ppm, número este muito próximo ao determinados nos perfis verticais aqui apresentados. Fato é que, em estudos mais recentes, o número da razão $CO:CO_2$ vêm decrescendo o que pode, inclusive, evidenciar a influência dos biomas Cerrado e Caatinga nos valores da Amazônia ou a própria modificação do bioma Amazônia. Também podemos prever que com a degradação da floresta, as razões serão menores, tanto pela substituição de algumas espécies vegetais, como pela redução da densidade vegetal e intensificação das estações secas, desta forma demonstrando a necessidade da atualização frequente dos valores da razão $CO:CO_2$, já que podem gerar grandes impactos em balanços de emissão na Amazônia.

Figura 5.52 - Resultados finais das razões CO:CO_2 nos quatro locais de amostragem e a média da Bacia Amazônica.



Fonte: Produção do autor.

5.6 Fluxos de CO e carbono proveniente da queima de biomassa

As amostragens aqui apresentadas, representam a primeira rede de medidas contínuas, de representatividade regional, e bem calibradas, em região de florestas tropicais. Tais medições são vitais devido a quase ausência medidas de escala regional de longo tempo em áreas tropicais, que é a causa subjacente das grandes incertezas nas estimativas de fluxo para regiões tropicais, obtidas pela modelagem inversa atmosférica (GATTI et al., 2014). No período de medidas estão compreendidos anos chuvosos, com extremos de seca e com a influência de dois fenômenos do "*El Niño*", o que nos gera uma boa representatividade do comportamento da Amazônia quanto aos fluxos de CO e de carbono proveniente da queima de biomassa.

Para o entendimento dos fluxos médios mensais, realizou-se o cálculo das áreas de influência por trimestre em cada local de amostragem, para que fossem compilados os parâmetros estudados (precipitação, anomalia GRACE, temperatura e focos de queimada) nas áreas trimestrais e aplicados a correção nos dados pelo "peso" referente à sua localização (vide secção 4.5). Obviamente que, para uma análise com maior fidelidade, o ideal seria o cálculo das áreas de influências mensais, no entanto, a determinação destas esbarra na limitação do método, o qual se utiliza da densidade de trajetórias para a determinação da área de influência, sendo assim, impossível a geração de áreas mensais justamente pela limitação de trajetórias. Nas Figuras 5.53 e 5.54 pode-se observar as áreas de influência calculadas para os quatro trimestres do ano de 2010 para os quatro locais de amostragem.

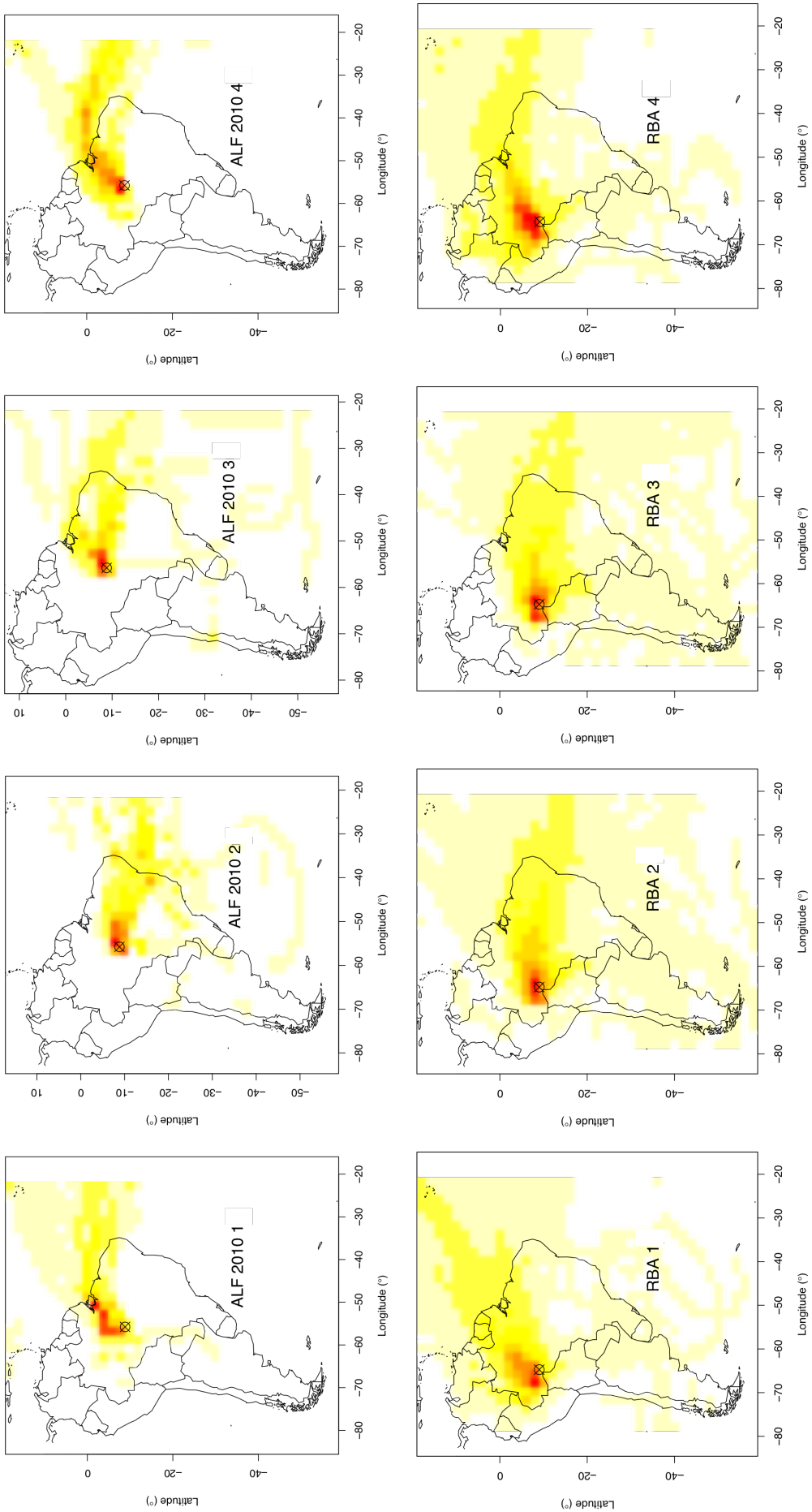


Figura 5.53 - Áreas de influência calculadas para os quatro trimestres do ano de 2010 para os locais de amostragem ALF e RBA.

Fonte: Produção do autor.

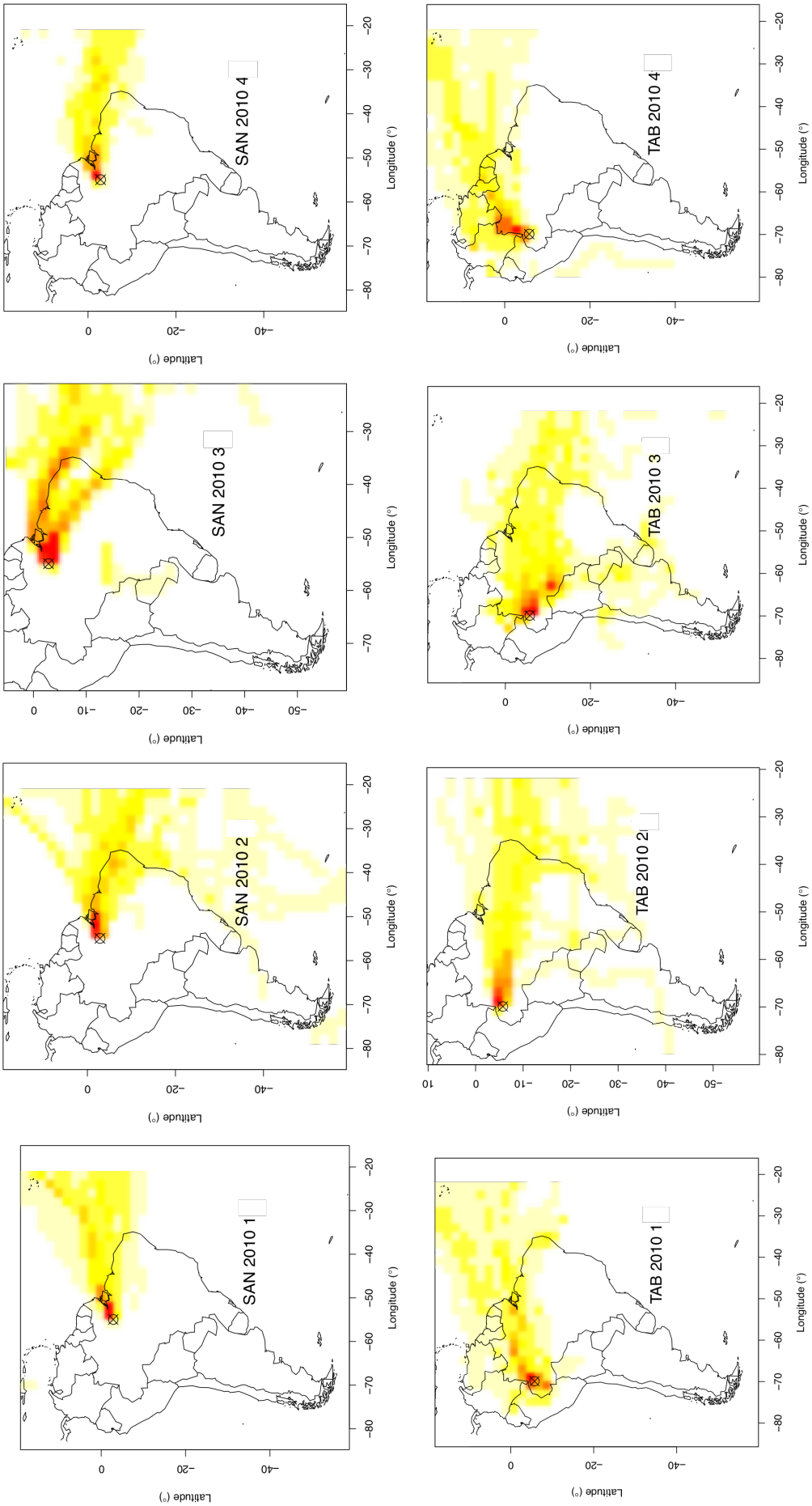


Figura 5.54 - Áreas de influência calculadas para os quatro trimestres do ano de 2010 para os locais de amostragem SAN e TAB.

Fonte: Produção do autor.

Após a realização de estudos comparativos com os parâmetros climáticos, apesar da utilização de ”pesos” nas áreas de influência, verificou-se a necessidade da delimitação de uma área com uma maior representatividade da Amazônia, funcionando como uma ”máscara” de delimitação para as áreas de influência, desta forma sendo ignorados os dados de variáveis climáticas localizadas na área de influência fora deste limite. EVA; HUBER, 2005 publicou a síntese dos resultados discutidos em *workshop* de consulta a especialistas organizado pela Comissão Europeia em colaboração com a Organização do Tratado de Cooperação Amazônica em junho de 2005. Neste, foi discutido qual a região que melhor representa a Amazônia e definida esta área atendendo à três critérios:

1) critério hidrográfico, baseado na extensão total da Amazônia (incluindo sistemas fluviais da Amazônia e do Tocantins) que formam o constituinte central da definição;

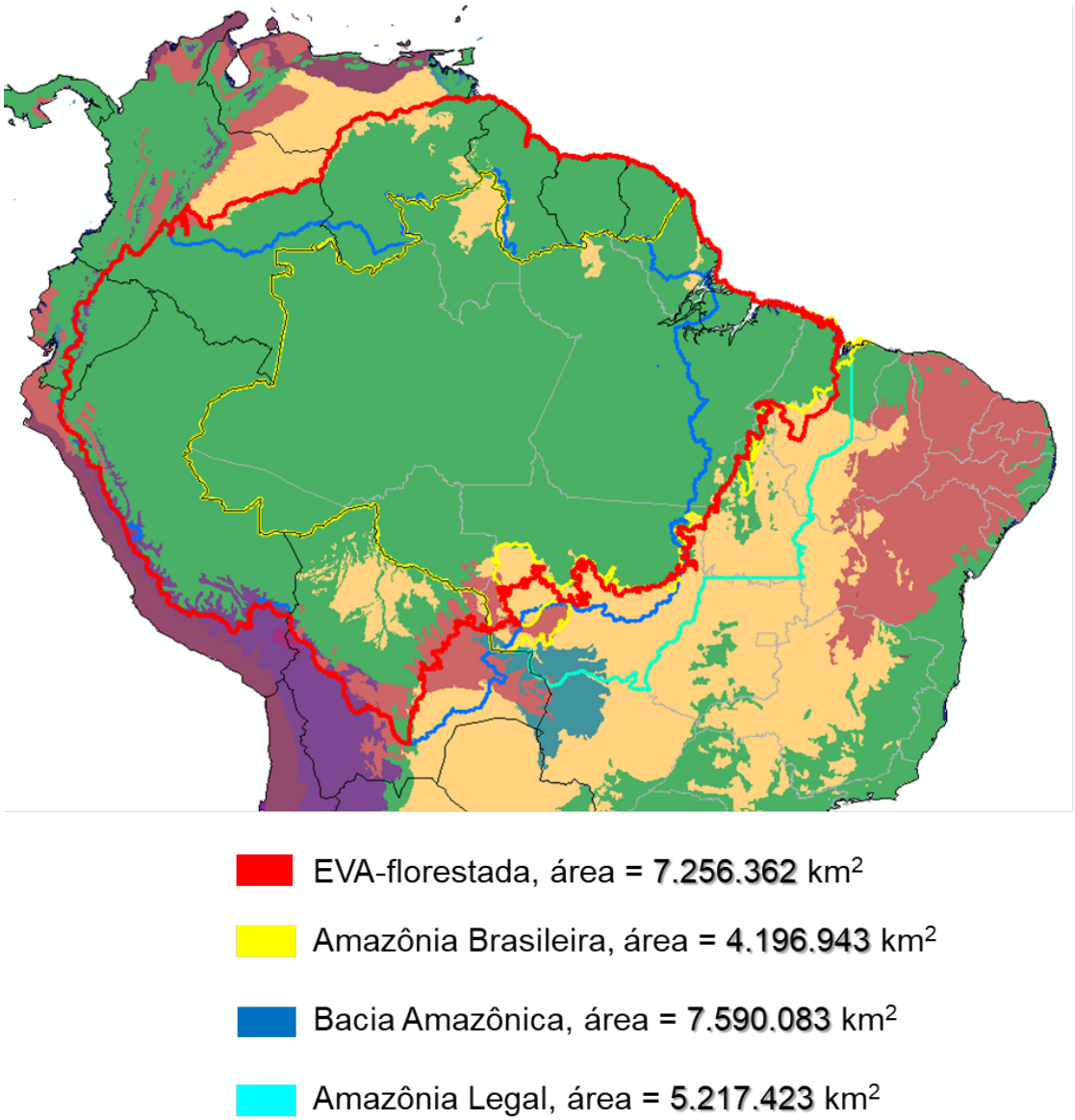
2) critério ecológico, subdividindo a Amazônia em três sub-regiões, que estão ligadas por fortes conexões ecológicas e funcionais, embora pertencentes para três eco-regiões diferentes;

3) critério biogeográfico, complementando a área anteriormente definida usando como indicador a conhecida extensão histórica do bioma da floresta tropical Amazônica no norte da América do Sul.

Em sua definição final, EVA; HUBER, 2005 destaca que uso de toda a Bacia hidrográfica da Amazônia traz algumas áreas/biomas para a região que geralmente não são considerados como amazônico (Andes). No entanto, eles desempenham um papel essencial no funcionamento do sistema hidrológico da Amazônia, pois elas contêm as cabeceiras do rios da bacia. Desta forma, incluiu-se na área de representatividade da Bacia Amazônica a região amazônica de várzea propriamente dita (Amazônia *stricto sensu*), a sub-região andina, incluindo a área da linha de altitude de 700 metros até as cabeceiras da Bacia, e a sub-região do Planalto incluindo os ecossistemas não florestais ao longo da fronteira sul da Bacia.

Por entender-se que a sub-região do Planalto, justamente por não incluir áreas florestadas, e representar regiões ao sul da Bacia, as quais possuem regimes de temperatura e precipitação desconformes ao apresentado em regiões florestadas e na Amazônia Legal, realizou-se uma adaptação à área proposta por EVA; HUBER, 2005, cuja sub-região do Planalto foi retirada. Esta nova área doravante será identificada como máscara EVA-florestada. Pode-se observar os limites desta área na Figura 5.55.

Figura 5.55 - Limites da máscara EVA-florestada, Amazônia brasileira, Bacia Amazônica e Amazônia Legal.



Fonte: Adaptado de EVA; HUBER, 2005 por Dra. Graciela Tejada em comunicação pessoal.

Após a definição da máscara tornou-se possível realizar novamente a distribuição das variáveis climatológicas em função ao ”peso” calculado por grade incidente na área de influência trimestral limitada pela máscara EVA-florestada.

Para uma representação espacial com maior resolução, foram analisados os dados de precipitação e temperatura provenientes da base de dados globais ERA-Interim, além do número de focos de queimada e os dados de anomalia provenientes do programa *Gravity Recovery and Climate Experiment* (GRACE). Este último com a intenção de avaliar a disponibilidade de água no solo.

Os satélites gêmeos GRACE, lançados em março de 2002, geraram mapas mensais ($\sim$ 30 dias) do campo gravitacional da Terra que permitem inferir anomalias de massa de superfície (SWENSON; WAHR, 2002). Estudos foram realizados utilizando os dados GRACE para a estimativa das variações dos padrões sazonais de disponibilidade de água no solo e de componentes do ciclo hidrológico, que foram avaliadas com sucesso quando comparadas à medidas terrestres (CROWLEY et al., 2008).

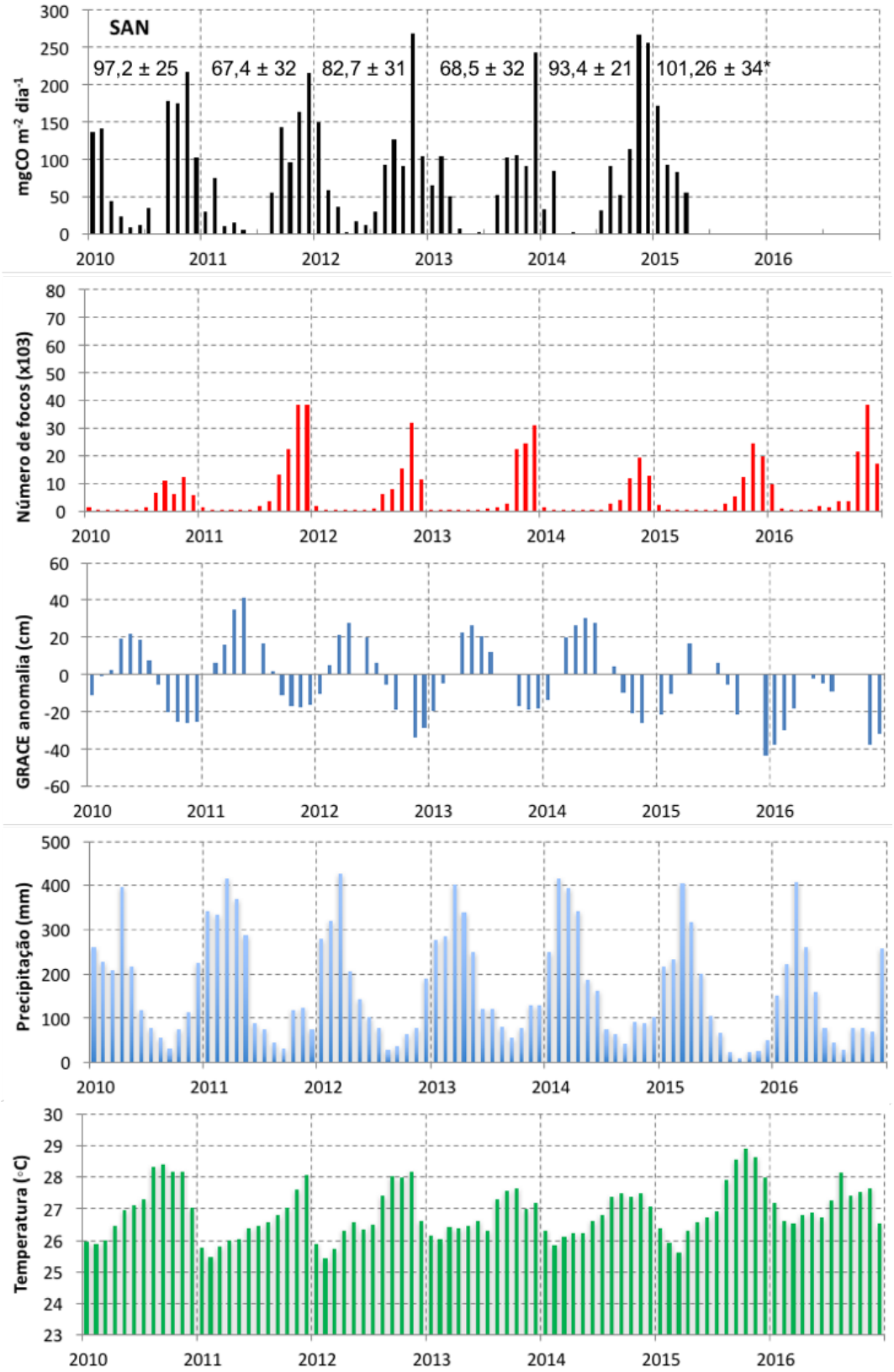
5.6.1 Fluxo de CO

Nas Figuras 5.56, 5.57, 5.58 e 5.59 pode-se observar a representação gráfica dos fluxos de CO mensais e valores médios anuais, juntamente com os dados das variáveis climatológicas calculados pela distribuição referente à AI trimestral para cada ano e local de amostragem.

O local de amostragem o qual apresentou os maiores fluxos anuais foi SAN (Figura 5.56). Justamente o local que apresenta um comportamento de fluxo distinto aos demais, apresentando altos fluxos de CO nos meses de janeiro e fevereiro e a partir de outubro. Nos primeiros meses do ano, os altos fluxos não são coincidentes com os picos de número de focos de queimada. No entanto, deve-se considerar que para o cálculo do fluxo, conforme a Equação 4.1, as concentrações dos gás determinadas nos perfis são subtraídas das concentrações de BKG e divididas pelo tempo de translado das massas de ar desde a costa até o local de amostragem. SAN, por ser o local de amostragem mais próximo a costa, apresentou um tempo de translado médio entre os anos de amostragem igual a 2,4 dias enquanto ALF, RBA e TAB/TEF, 5,1, 6,6 e 5,9 dias respectivamente. Desta forma SAN apresenta um tempo médio cerca de 50% inferior aos demais o que significa que, proporcionalmente, o fluxo é maior do que nos demais locais, pois acontecem em um menor tempo para que ocorra as interações na atmosfera-biosfera como a formação CO pela oxidação do radical hidroxila (OH^-) (GATTI et al., 2010). Todavia, este é um fator relevante que deve ser considerado nas discussões comparativas entre os locais de amostragem.

Em números totais, SAN apresentou uma emissão média para o fluxo de CO no período de estudo igual a 82 $\pm$ 14 mgCO m^{-2} dia^{-1}. Para este cálculo, os fluxos do ano de 2015 foram desconsiderados por apresentarem medidas em apenas três meses, infelizmente.

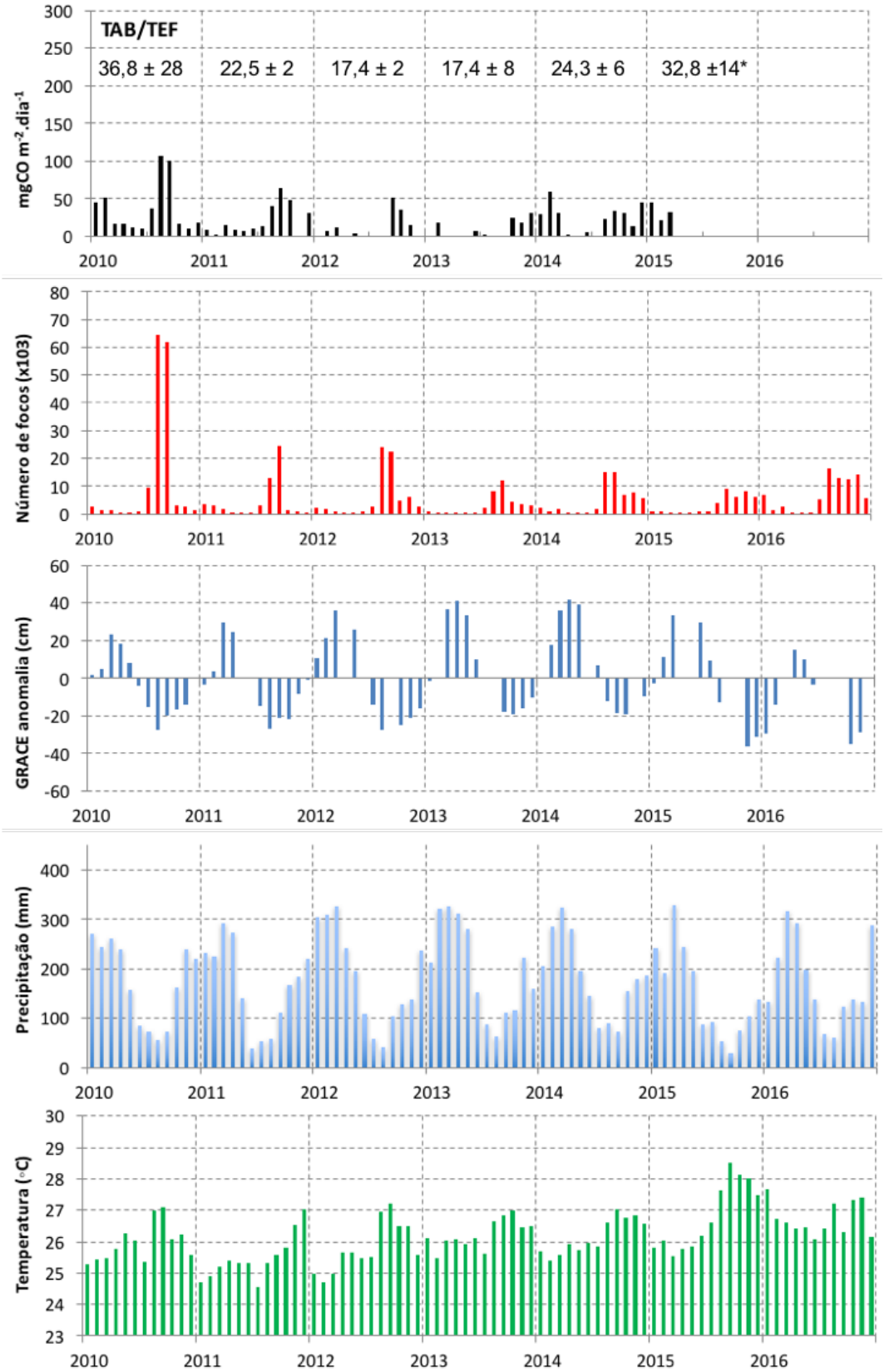
Figura 5.56 - Representação gráfica da série temporal das médias mensais de fluxo de CO, com as relativas médias anuais, número de focos de queimada, dados de anomalia GRACE, precipitação e temperatura relativas às AI trimestrais de cada ano para SAN.



* ano com amostragens incompletas.

Fonte: Produção do autor.

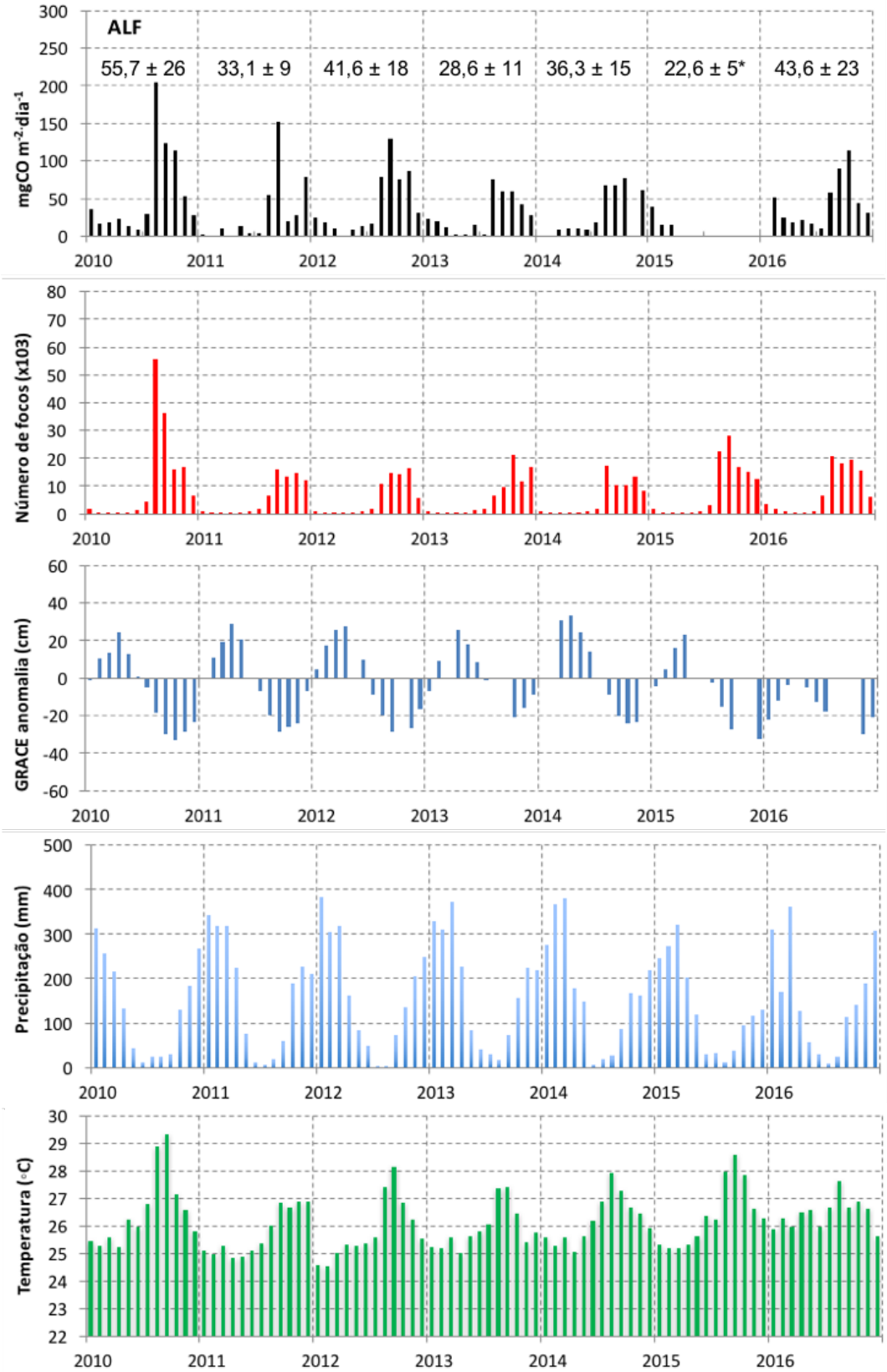
Figura 5.57 - Representação gráfica da série temporal das médias mensais de fluxo de CO, com as relativas médias anuais, número de focos de queimada, dados de anomalia GRACE, precipitação e temperatura relativas às AI trimestrais de cada ano para TAB/TEF.



* ano com amostragens incompletas.

Fonte: Produção do autor.

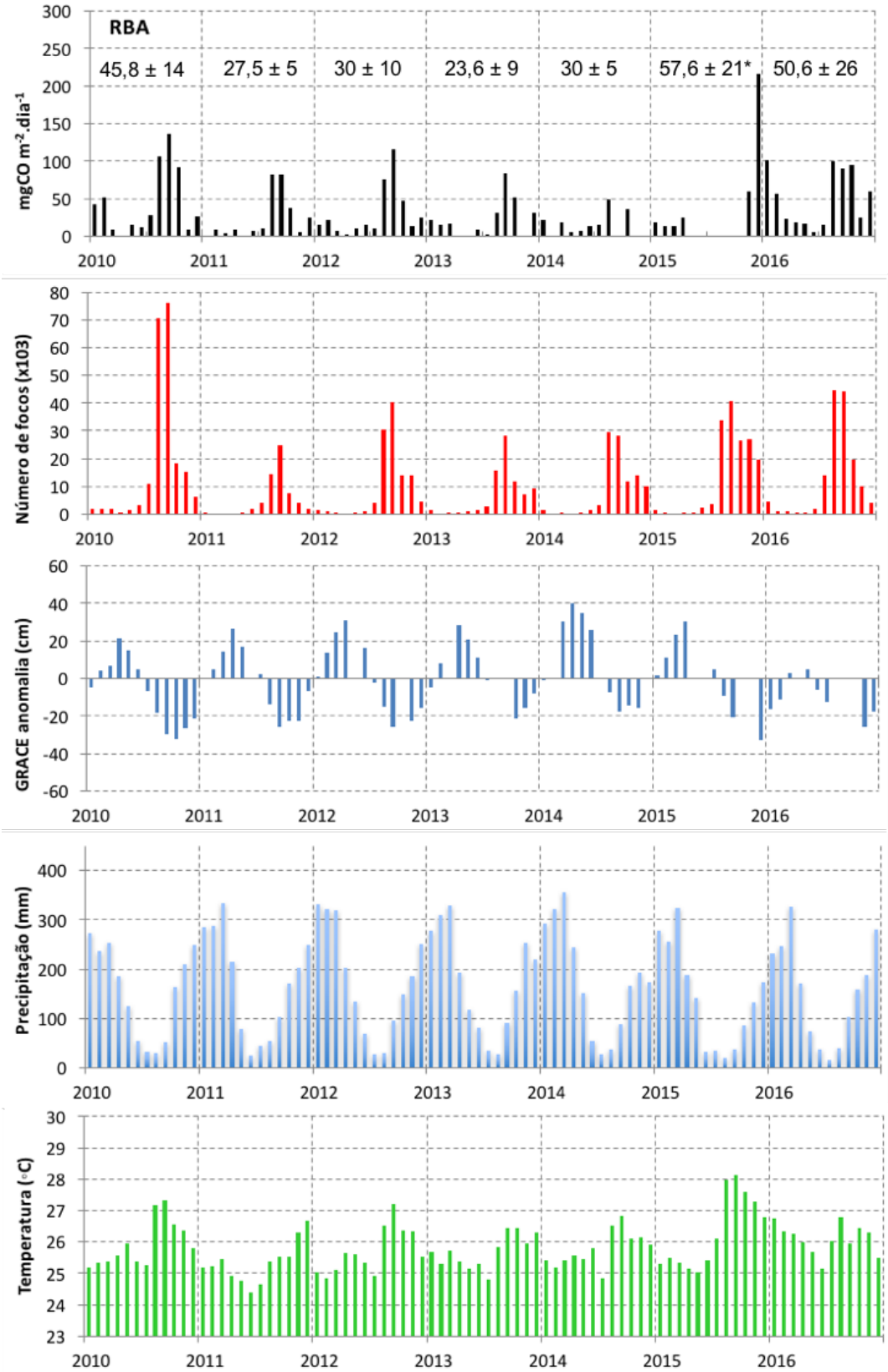
Figura 5.58 - Representação gráfica da série temporal das médias mensais de fluxo de CO, com as relativas médias anuais, número de focos de queimada, dados de anomalia GRACE, precipitação e temperatura relativas às AI trimestrais de cada ano para ALF.



* ano com amostragens incompletas.

Fonte: Produção do autor.

Figura 5.59 - Representação gráfica da série temporal das médias mensais de fluxo de CO, com as relativas médias anuais, número de focos de queimada, dados de anomalia GRACE, precipitação e temperatura relativas às AI trimestrais de cada ano para RBA.



* ano com amostragens incompletas.

Fonte: Produção do autor.

TAB/TEF (Figura 5.57) foi o local de amostragem que apresentou os menores fluxos de CO comparando os anos e na média do período, com um total de 23,7 $\pm$ 8 mgCO m^{-2} dia^{-1}. Conforme já discutido é o local cuja AI está inserida em regiões com alta densidade de florestas e, sendo o maior fluxo registrado no ano de 2010, quando ocorreu o pico de número de focos de queimada da série histórica. Vale destacar também que, por ser o local mais remoto entre os locais de amostragem, foram encontradas diversas dificuldades para a manutenção da frequência das amostragens, de ordem logística e, também, pelo fato de que ocorreu um acidente com avião utilizado para a realização das coletas, nos forçando à modificar empresa responsável por estas e ocorreram diversas falhas nas amostragens fazendo com que dados fossem desconsiderados. Por estes motivos, ocorreram falhas em meses importantes de contribuição no fluxo, como agosto de 2012, quando ocorre o pico de número de focos neste ano, agosto e setembro de 2013. No entanto, anos nos quais ocorreram amostragens em grande parte dos mesmo (2010 e 2011), os valores dos fluxos de CO neste corroboram com o resultado total, sendo TAB/TEF o local que apresenta os menores fluxos de CO.

ALF e RBA (Figuras 5.58 e 5.59), locais que sofrem bastante a influência da região do Arco do Desflorestamento, apresentaram fluxos médios totais de CO iguais a 39,8 $\pm$ 9 mgCO m^{-2} dia^{-1} e 36,6 $\pm$ 14 mgCO m^{-2} dia^{-1} respectivamente, para o período de 2010 à 2016. RBA apresenta um grande pico de fluxo em dezembro de 2015, com as quatro amostragens realizadas, seguindo um alto fluxo no ano de 2016, que foi um ano no qual ocorreram grandes emissões nos meses iniciais e finais do ano, colaborando para a elevação da média anual. Este mesmo comportamento é visto em ALF, no entanto 2010 foi o ano com a maior média no fluxo de CO.

Para auxiliar na discussão dos fatores que influenciam as emissões de CO, realizou-se a correlação estatística, conforme apresentado na secção 4.7, do fluxo médio mensal de CO com os resultados mensais da média ponderada de temperatura e soma mensal de precipitação a partir dos dados da base global ERA-Interim, da soma dos resultados GRACE e da soma do número de focos de queimada. As correlações entre o fluxo de CO e as demais variáveis estão apresentadas na Tabela 5.6 e, os valores utilizados podem ser observados nas Figuras 5.56, 5.57, 5.58 e 5.59.

Tabela 5.6 - Resultados das relações estatísticas para cada local de amostragem correlacionando o fluxo médio mensal de CO com focos de queimada, anomalia GRACE, precipitação e temperatura com seus respectivos coeficiente de correlação (R), R^2 ajustado (na tabela representado por R^2) e o *p-value*.

mgCO m^{-2} dia^{-1}		Focos de queimada	GRACE	Precipitação	Temperatura
ALF	R	0.85	-0.63	-0.27	0.78
	R2	0.73	-0.40	-0.07	0.61
	p-value	4.03E-07	2.13E-07	1.62E-02	8.29E-18
RBA	R	0.75	-0.61	-0.22	0.71
	R2	0.56	-0.37	-0.04	0.49
	p-value	7.00E-05	2.34E-07	4.35E-02	3.38E-13
SAN	R	0.72	-0.82	-0.31	0.49
	R2	0.52	-0.67	-0.09	0.23
	p-value	6.21E-09	1.95E-18	7.30E-03	1.00E-05
TAB/TEF	R	0.72	-0.58	-0.26	0.40
	R2	0.51	-0.32	-0.05	0.14
	p-value	5.36E-11	4.00E-05	4.08E-02	1.52E-03

A primeira constatação foi com relação à precipitação. Em nenhum dos locais de amostragem ocorreu forte correlação com o fluxo de CO. Como era de se esperar ocorreu uma correlação negativa, já que em meses de seca, ocorrem os maiores fluxos de CO. No entanto como visto nas figuras comparativas de fluxo e precipitação, vê-se emissões em meses chuvosos, contribuindo para o resultado apresentado e para que os valores de *p-value* ficassem próximos à aceitação da hipótese nula, confirmando a inexistência de correlação.

Por outro lado, em todos os locais de amostragem ocorreram correlações negativas significativas com a disponibilidade de água no solo representada pelos dados de anomalia GRACE. Consultada a literatura, não foram encontrados estudos do tempo de contribuição da precipitação para águas subterrâneas na Bacia Amazônica, à vista disso, foi realizado um exercício de comparação entre os dados GRACE e de precipitação que sugeriu um tempo de resposta de cerca de 2 meses para que a precipitação tenha uma maior correlação com a disponibilidade de água no solo. Na Tabela 5.7 pode-se ver os resultados obtidos neste exercício, com as relações estatísticas entre os dados de precipitação com um deslocamento temporal de 2 meses a frente do registrado com os dados GRACE e de fluxo de CO.

Tabela 5.7 - Resultados das relações estatísticas para cada local de amostragem correlacionando os dados de precipitação adiantados 2 meses com os dados de GRACE e fluxo de CO, com os respectivos coeficiente de correlação (R), R^2 ajustado (na tabela representado por R^2) e o *p-value*.

		GRACE x Precipitação 2 meses	Fluxo CO x Precipitação 2 meses
ALF	R	0.85	0.65
	R2	0.73	0.41
	p-value	2.17E-18	0.00E+00
RBA	R	0.87	0.62
	R2	0.75	0.38
	p-value	1.68E-18	9.32E-18
SAN	R	0.87	0.72
	R2	0.76	0.52
	p-value	3.25E-19	0.00E+00
TAB/TEF	R	0.84	0.61
	R2	0.70	0.36
	p-value	2.01E-16	3.13E-14

Como vê-se, realmente há uma forte correlação entre a precipitação e os dados de disponibilidade de água no solo com o deslocamento temporal da primeira variável e, também, nota-se que, apesar de ainda não demonstrar forte correlação, ocorreu uma melhora significativa entre as relações do Fluxo de CO e precipitação. Desta forma, é possível averiguar que, para dados de fluxo de CO, chuvas ocorridas em meses anteriores, terão seu pico de influência no segundo mês conseguinte as estas, demonstrando que estiagens prolongadas favorecem ao aumento de queimadas e, consequentemente, às emissões de CO.

Voltando aos resultados apresentados na Tabela 5.6, em todos os locais de amostragem foram encontradas altas correlações entre o fluxo mensal de CO e número de focos de queimada. Neste caso não se pode descartar o efeito sazonal embutidos nestes dados. Em outras palavras, o pico do fluxo de CO ocorre junto ao pico de número de focos de queimada, fazendo com que naturalmente sejam correlacionados, no entanto, sabendo que a principal fonte de CO na Amazônia é a queima de biomassa, uma anti-correlação, resultaria na completa incredulidade dos dados aqui apresentados. Em outro aspecto, a forte correlação entre as variáveis vêm a confirmar os resultados de fluxo encontrado para os locais de amostragem.

Outra importante observação é a forte correlação entre os dados de

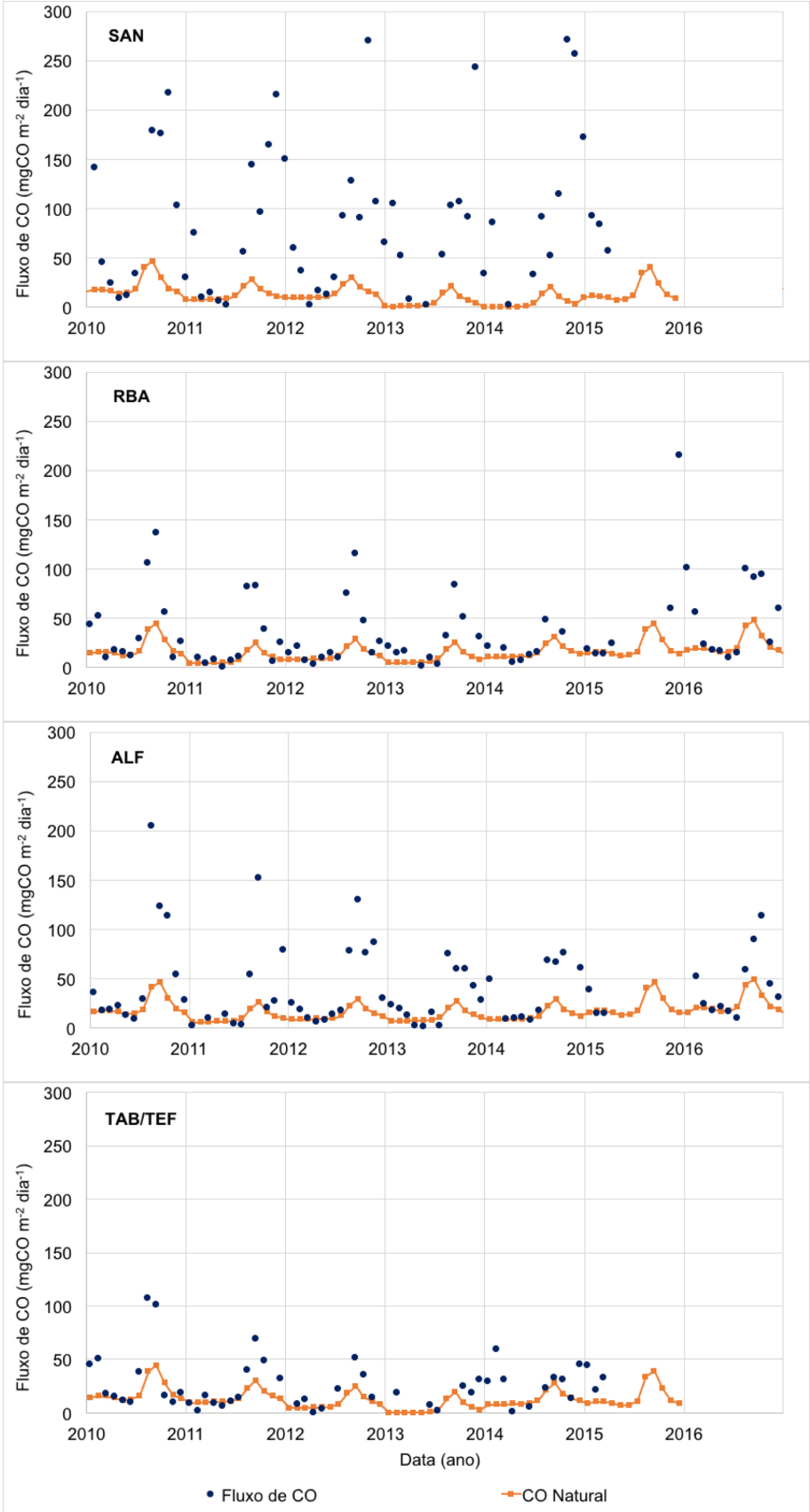
temperatura e fluxo de CO nos locais de amostragem presentes na região Sul da Amazônia. Nestes dois locais também ocorre uma forte correlação entre focos de queimada e temperatura, o mesmo não ocorrendo nos locais na porção Norte, apresentando correlação de menor intensidade. Esta é uma conclusão alarmante já que com a contínua emissão de gases de efeito estufa na atmosfera tem como resultado o aumento da temperatura global e, como visto nas séries históricas aqui apresentadas, já ocorre uma tendência de aquecimento na Bacia Amazônica. Assim posto, observa-se uma reação de causa-efeito perigosa já que o aumento das temperaturas estão vinculados ao aumento de queimadas, que por sua vez, é causa do aumento de emissão e do fluxo de CO, demonstrado, mais uma vez, a importância e necessidade do monitoramento continuo da região para acompanhamento deste processo.

5.6.2 Fluxo de Carbono proveniente da queima de biomassa (F_{Fogo})

Calculado neste estudo por meio da Equação 4.7, além dos já apresentados Fluxo de CO e razão CO:CO_2, a metodologia inclui as emissões de CO chamadas de ”naturais” que, em estudos anteriores, foram utilizadas os fluxos de CO presentes na estação chuvosa (GATTI et al., 2010; DOMINGUES, 2013; GATTI et al., 2014). Neste estudo, além destes, foi utilizado o modelo químico chamado IMAGESv2 em metodologia aplicada por Jean-François Mülle e comunicada por Dr. John Miller e Dr. Sourish Basu, o qual calcula as emissões naturais de CO ajustando-as com os fluxos de CO obtidos nos perfis verticais, utilizando-se os perfis realizados no final da estação chuvosa até a transição para estação seca (abril a junho). Desta forma, foi calculada a diferença entre os valores de CO natural obtidos pelo modelo e o valor médio obtido nos perfis no período citado. A diferença entre estes foi aplicada aos valores calculados a partir do modelo.

A principal diferença entre os estudos é que com a utilização do modelo, obtém-se uma série temporal de emissões ao invés de somente um valor proveniente da média de fluxos da estação chuvosa. Na estação seca ocorre o pico de emissão de isopreno pelas plantas, que oxida o radical hidroxila (OH^-) gerando o CO como subproduto (KESSELMEIER et al., 2002; KUHN et al., 2007), desta forma ocorrendo emissões naturais na estação seca em maiores quantidades do que na estação chuvosa. Estas podem ser observadas na apresentação dos resultados de fluxo de CO natural para cada local de amostragem conforme a Figura 5.60.

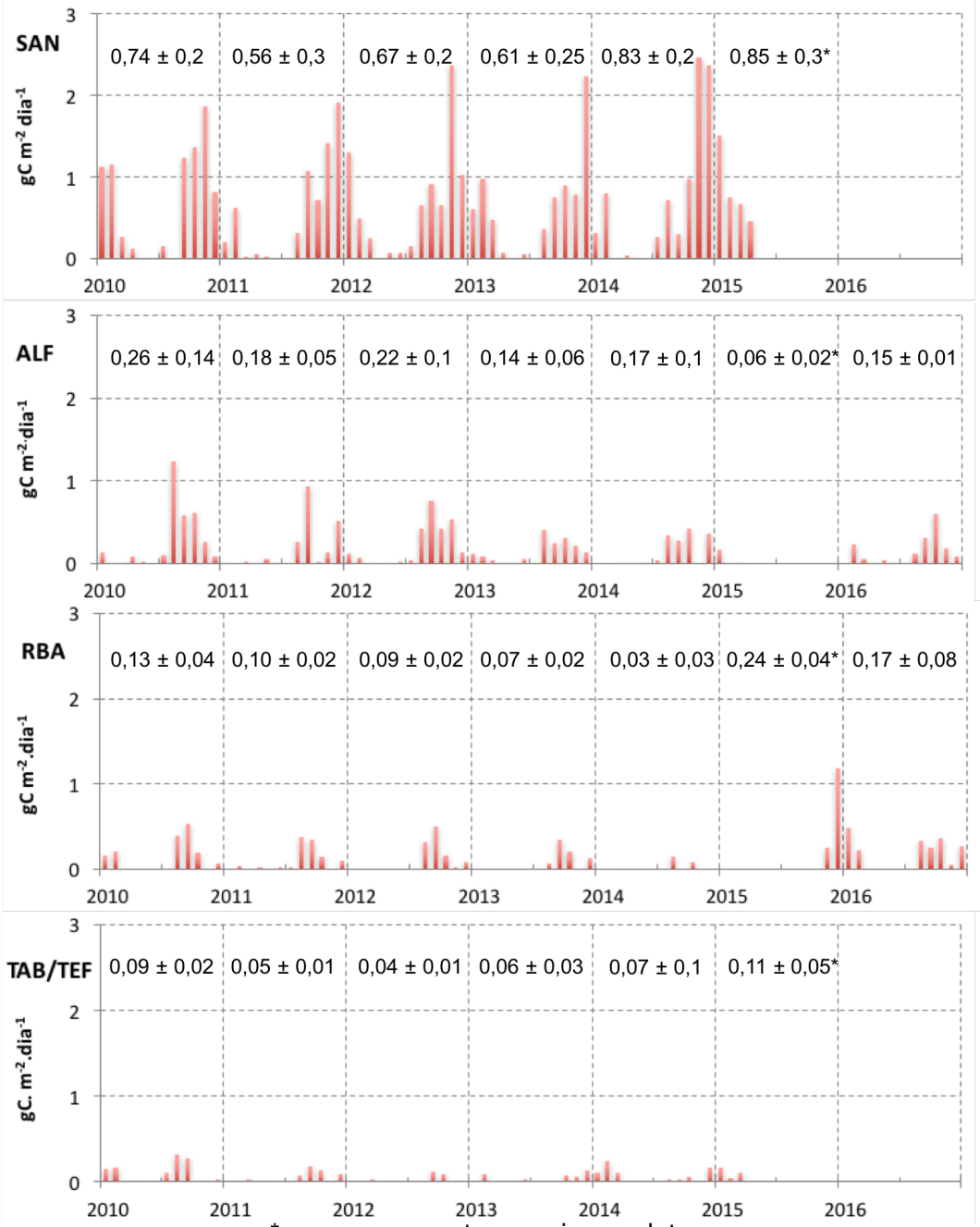
Figura 5.60 - Fluxos de CO (círculos em azul) e o fluxo natural de CO (quadrados e linha em marrom) calculados para os quatro locais de amostragem.



Fonte: Comunicação pessoal Dr. John Miller, Dr. Sourish Basu e Dra. Luciana Gatti.

Utilizando-se dos dados de razões CO:CO_2, fluxo de CO e de fluxo de CO natural obtidos por local de amostragem, o fluxo de Carbono das emissões provenientes da queima de biomassa (F_{Fogo}) foi calculado. Na Figura 5.61 vê-se os resultados obtidos por local de amostragem em série temporal.

Figura 5.61 - Série temporal dos fluxos de Carbono provenientes da queima de biomassa por local de amostragem.



* ano com amostragens incompletas.

Fonte: Produção do autor.

Novamente em emissões locais e, devido ao alto fluxo de CO e uma

razão CO:CO_2 baixa, SAN foi o local onde foram registrados os maiores fluxos de F_{Fogo} sendo o ano de 2010 e o incompleto ano de medidas, 2015, os anos nos quais ocorreram os maiores fluxos provenientes da queima de biomassa nos quatro locais de estudo, que pela direta relação, reproduzem o mesmo comportamento discutido em relação ao fluxo de CO.

Contudo, as correlações com variáveis climatológicas podem sofrer alterações assim, a mesma relação estatística proposta ao fluxo de CO, foi aplicada ao F_{Fogo}. Na Tabela 5.8, apresenta-se os resultados desta.

Tabela 5.8 - Resultados das relações estatísticas para cada local de amostragem correlacionando o fluxo médio mensal de Carbono (F_{Fogo}) com focos de queimada, anomalia GRACE e temperatura com o fluxo de Carbono (F_{Fogo}) e os respectivos coeficiente de correlação (R), R^2 ajustado (na tabela representado por R^2) e o *p-value*.

gC m^{-2} dia^{-1}		Focos de queimada	GRACE	Temperatura
ALF	R	0.84	-0.59	0.72
	R2	0.71	-0.34	0.52
	p-value	0.00E+00	2.04E-06	2.27E-14
RBA	R	0.66	-0.55	0.65
	R2	0.43	-0.30	0.42
	p-value	1.14E-11	6.40E-06	2.64E-11
SAN	R	0.72	-0.81	0.41
	R2	0.52	-0.65	0.17
	p-value	1.16E-12	9.81E-13	3.20E-04
TAB/TEF	R	0.58	-0.49	0.26
	R2	0.34	-0.22	0.07
	p-value	1.00E-06	7.20E-04	4.38E-02

Vê-se que não foram apresentados os resultados de correlação entre o F_{Fogo} e precipitação, igualmente ao fluxo de CO. Todavia, o fator que mais demonstrou correlação foram os focos de queimada calculados pelas AI trimestrais para cada local de amostragem. ALF e RBA, locais ao sul da Amazônia, novamente apresentaram altas correlações com os dados de temperatura sendo, em ambos os casos, focos de queimada e temperatura os principais *drivers* para a emissão proveniente da queima de biomassa. Em SAN, ocorreu uma forte correlação entre os dados GRACE, de disponibilidade de água no solo e focos de queimada, assim como em TAB, no entanto, em menor intensidade.

Em um novo estudo estatístico, foi realizada a junção das principais variáveis apontadas para cada local de amostragem. Em ALF, focos de queimada e

temperatura apresentaram um coeficiente de correlação (R) igual a 0,85, quando analisados juntamente com o F_{Fogo}. Este número pode retratar que 85% do F_{Fogo} está diretamente relacionado a estas variáveis, determinando-as como os principais *drivers* neste local. Em RBA, com comportamento semelhante a ALF, as correlações apresentaram um R igual a 0,70 e, quando adicionado os dados de disponibilidade de água no solo, apresentou um R igual a 0,68, portanto demonstrando a influência dos três fatores analisados ao F_{Fogo}.

Em SAN, focos de queimada e GRACE, apresentaram uma influência em 84% do F_{Fogo}. Portanto na região localizada ao extremo Leste da Amazônia, estes se apresentam como os principais *drivers* para emissões por queima de biomassa.

TAB, local que apresentou correlações em menores intensidades, quando analisadas as três variáveis de forma conjunta, estas são capazes de explanar ou são a causa de 75% dos dados de F_{Fogo}.

É importante observar que as regiões que possuem as maiores AI (RBA, TAB/TEF), são as mesmas que apresentaram menores correlações com as variáveis apresentadas. Este fato pode ser interpretado de duas formas. A primeira, por se tratar de regiões extensas, estas sofrem influências de diferentes biomas, composições de flora, o que fazem que os resultados não sejam mais assertivos como em ALF e SAN. A segunda, por serem locais com maiores índices de preservação de mata, sofrendo menos com o desmatamento, a disponibilidade de água e temperatura geram um menor impacto, além de apresentarem uma menor incidência de focos de queimada em relação proporcional de área quando comparadas a ALF e SAN.

5.7 Números finais de emissão extrapolados para Bacia Amazônica

Conforme as Equação 4.2, é possível escalonar os fluxos anuais mensais utilizando-se das AI médias anuais. Na Tabela 5.9 pode-se observar as dimensões de cada AI de cada local de amostragem em hectares para os anos de análise.

Tabela 5.9 - Dimensões em hectares das áreas de influência para os locais e anos de amostragens.

	RBA	TAB/TEF	ALF	SAN
2010	38144	41078	13112	5868
2011	42056	34721	20539	8803
2012	32765	25919	12226	6357
2013	31298	20539	13204	5868
2014	30809	26408	11248	5868
2015*	30809	19561	14182	6357
2016	37166	27386	25430	7335

* ano incompleto, AI formada a partir dos perfis realizados.

Vê-se que RBA e TAB/TEF são os locais de amostragem que apresentaram as maiores AI, seguidos de ALF e SAN. Como ocorre a multiplicação do fluxo calculado em um local de amostragem pela sua referida AI, apesar dos altos valores determinados em SAN, tanto para fluxo de CO quanto para o F_{Fogo}, sua contribuição é reduzida.

Seguindo a Equação 4.3, os resultados de fluxo foram escalonados para a área de referência EVA-florestada (Figura 5.55) com uma dimensão calculada igual a 7.256.362 km^2, gerando os resultados finais de emissão anual para o período estudado. É importante ressaltar que temos três cenários distintos de fluxo médio anual. Ocorreram amostragens em quatro locais entre os anos de 2010 e 2014. 2015 é um ano no qual foi desconsiderado em média anual pelo fato da amostragem ter ocorrido em apenas alguns meses do ano. Em 2016, foram realizadas amostragens somente em ALF e RBA, o que, em teoria, impediria uma comparação direta entre os anos com os quatro locais de estudo contribuindo para a média da Amazônia. Desta forma foi realizado um estudo comparativo com os resultados finais anuais obtidos nos quatro locais de amostragem no período de 2010 a 2014, como vê-se na Tabela 5.10, e outro estudo no período de 2010 à 2016, somente com os locais de amostragem ALF e RBA, como vê-se na Tabela 5.11.

Tabela 5.10 - Resultados das emissões anuais de Carbono calculados pelo fluxo de CO em TgC ano^{-1} e F_{Fogo} em PgC ano^{-1} escalonados para a área EVA-florestada nos anos de 2010 à 2014.

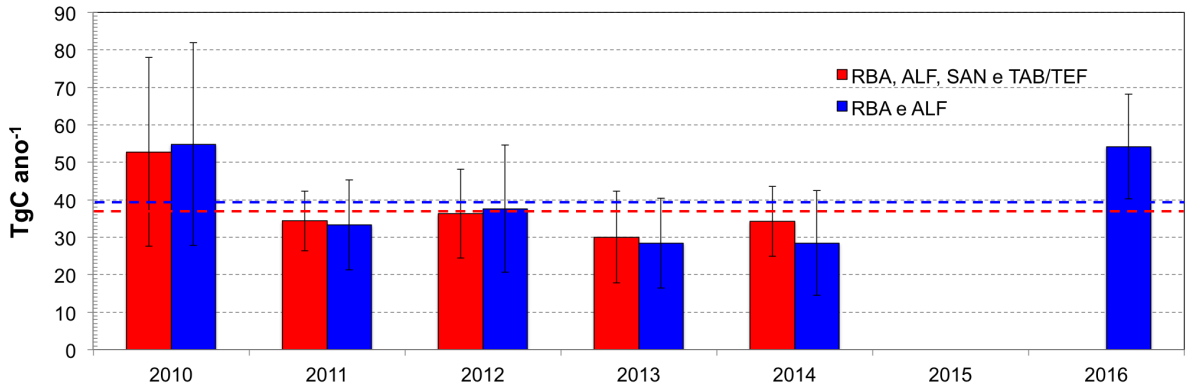
	2010	2011	2012	2013	2014
CO (TgC ano^{-1})	52 ± 25	34 ± 8	36 ± 12	30 ± 12	34 ± 12
F_Fogo (PgC ano^{-1})	0.44 ± 0.14	0.36 ± 0.13	0.37 ± 0.12	0.32 ± 0.13	0.33 ± 0.21

Tabela 5.11 - Resultados das emissões anuais de Carbono calculados pelo fluxo de CO em TgC ano^{-1} e F_{Fogo} em PgC ano^{-1} escalonados para a área EVA-florestada nos anos de 2010 à 2016, considerando somente os resultadois obtidos em ALF e RBA.

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
CO (TgC ano^{-1})	54 ± 27	33 ± 12	38 ± 17	28 ± 12	28 ± 14	-	54 ± 28
F_Fogo (PgC ano^{-1})	0.44 ± 0.17	0.33 ± 0.11	0.33 ± 0.1	0.24 ± 0.15	0.17 ± 0.23	-	0.42 ± 0.14

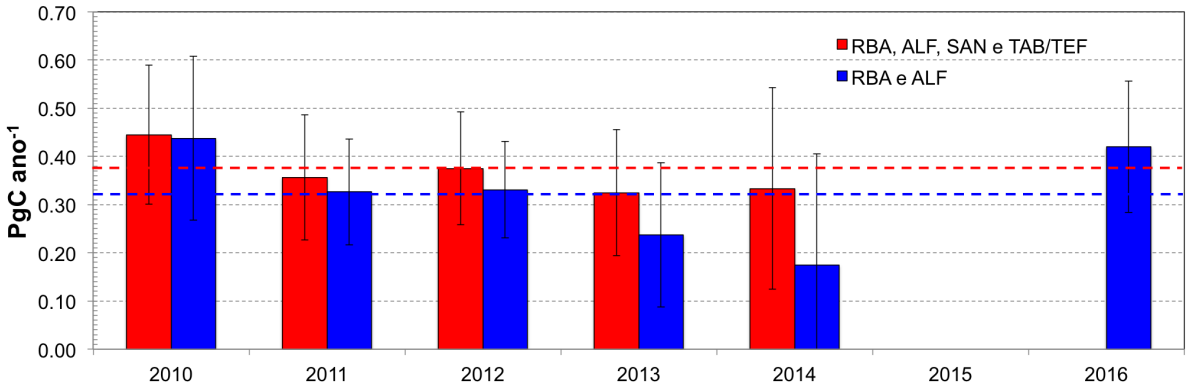
Observa-se que o comportamento mediano para todo o período com os quatro locais de estudo apresentam um resultado próximo ao comportamento mediano utilizando apenas os locais de estudo RBA e ALF, apresentando uma diferença de apenas 10%, sendo que este valor é menor do que a variabilidade das próprias médias. Além disso, observando-se as Figuras 5.24 e 5.32, constata-se que ambas regiões representam grande parte da Amazônia, corroborando para a proximidade entre os resultados das médias para todo o período de estudo, utilizando os quatro locais de estudo ou apenas RBA e ALF. Ressalta-se que a região Norte da Amazônia, utilizando apenas RBA e ALF, possui uma menor representatividade, do que quando tem-se os quatro locais de estudo. Desta forma, 2016 é incluído na avaliação desta série temporal apenas para RBA e ALF. Nas Figuras 5.62 e 5.63, apresenta-se os resultados das médias anuais dos fluxos de CO e F_{Fogo} para os quatro locais de estudo e, também, para quando utiliza-se apenas RBA e ALF.

Figura 5.62 - Série temporal dos resultados anuais das emissões de Carbono oriundos do cálculo do fluxo de CO, escalonados para a área EVA-florestada, utilizando os quatro locais de amostragem (barras em vermelho) e somente RBA e ALF (barras em azul). Também apresenta-se a média para todo período compreendido entre os anos 2010 a 2014 para os quatro locais de estudo (linha vermelha) e, de 2010 à 2016, para RBA e ALF (linha azul).



Fonte: Produção do autor.

Figura 5.63 - Série temporal dos resultados anuais das emissões de Carbono pela queima de biomassa, escalonados para a área EVA-florestada, utilizando os quatro locais de amostragem (barras em vermelho) e somente RBA e ALF (barras em azul). Também apresenta-se a média para todo período compreendido entre os anos 2010 a 2014 para os quatro locais de estudo (linha vermelha) e, de 2010 à 2016, para RBA e ALF (linha azul).



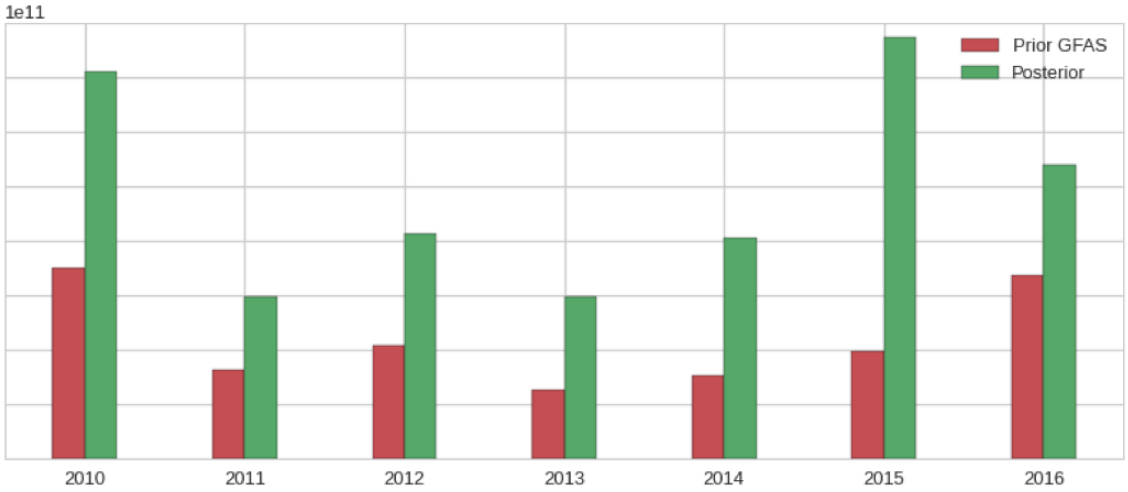
Fonte: Produção do autor.

Nesta série temporal, de RBA e ALF, vê-se que ocorreram dois picos de emissão, em 2010 e 2016, anos nos quais ocorreram o fenômeno do *El Niño*. Observa-se, também, que no comportamento mediano (linhas vermelhas e azuis) ambas as séries com quatro locais de estudo ou apenas RBA e ALF, apresentam um comportamento muito similar para o Fluxo de CO (Figura 5.62), na qual observa-

se que 2016 apresenta uma emissão semelhante à 2010. Analisando-se as emissões de Carbono oriundas da queima de biomassa, observa-se também que 2016 apresenta uma emissão próxima à 2010. Ainda, apesar do comportamento mediano de ambas as séries de emissão de queima de biomassa serem semelhantes, observa-se que as regiões Norte da Amazônia, principalmente SAN, representam uma grande variação nos anos de 2013 e 2014 pois, como vê-se na Figura 5.61, este período apresentou emissões por queima de biomassa acima da média nesta região, enquanto que, nas regiões de ALF e RBA ocorreram emissões abaixo da média.

O ano de 2015 não foi considerado neste cálculo pela insuficiência de dados, tanto para a extrapolação anual dos fluxos, quanto para o cálculo das AI. No entanto, como já citado, e a partir dos altos valores de emissão encontrados nos perfis realizados no final deste ano, na tentativa de adicionar valores ao mesmo, em janeiro de 2019, o autor deste esteve durante um mês na Universidade de Wageningen, na Holanda, onde trabalhou na aplicação do modelo TM5 com a inserção dos dados obtidos nas amostragens realizadas por perfis verticais. Na Figura 5.64 pode-se observar o comportamento/configuração das emissões de CO anuais calculadas a partir do modelo. Em vermelho, denominado ”Prior GFAS”, as emissões calculadas somente com os dados oriundos do *Global Fire Assimilation System* (GFAS) e, em verde, denominado Posterior, os resultados após a inserção das medidas de perfis verticais.

Figura 5.64 - Série temporal dos resultados anuais das emissões de CO pela queima de biomassa escalonados para a área EVA-florestada.



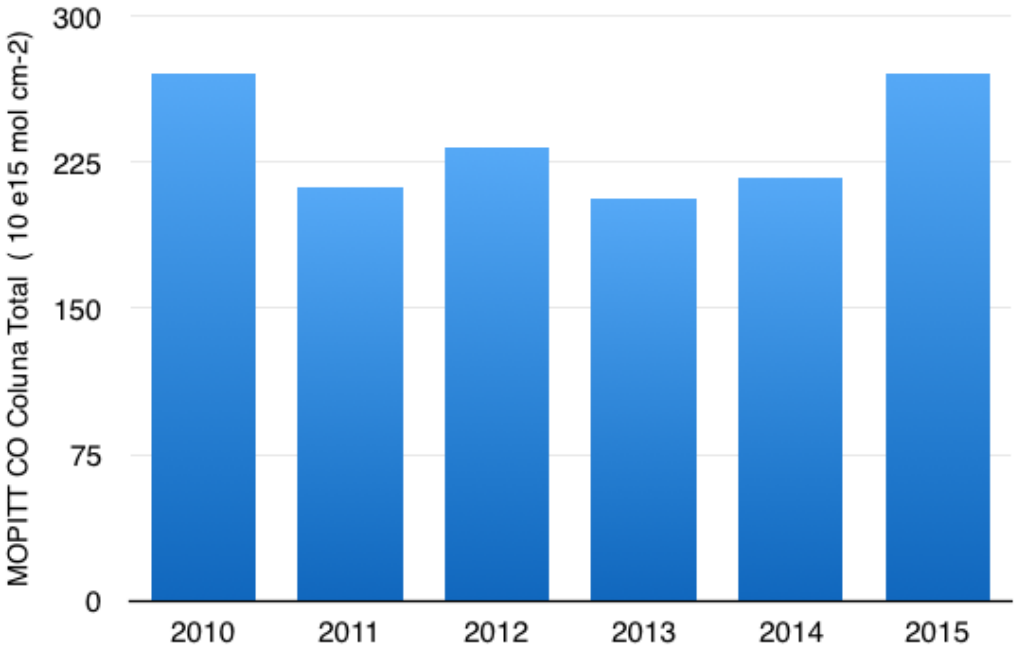
Fonte: Comunicação pessoal de Stijn Naus.

Como observa-se a partir do modelo, em 2015 ocorreu uma emissão de

CO de maior magnitude relativas à 2010 e 2016. Ocorre também uma concordância no comportamento entre os anos, comparando as séries apresentadas, com exclusão à 2016, que apresentou menor emissão em relação à 2010. Este é um estudo sob a coordenação de Dra Luciana Vanni Gatti e Dr. Wouter Peters e que se encontra em desenvolvimento para publicação dos resultados.

Poucos estudos são encontrados na literatura relacionados à emissão de CO em medidas na Amazônia. Em 2016, DEETER et al., publicou uma validação dos resultados obtidos pelo satélite MOPITT ("*Measurements of Pollution in the Troposphere*") relacionando-os com as medidas realizadas no perfis verticais. Conforme a Figura 5.65, os resultados obtidos pela coluna total de CO com o MOPITT também reproduzem o mesmo comportamento apresentado.

Figura 5.65 - Série temporal obtida pela coluna total de CO com o satélite MOPITT.

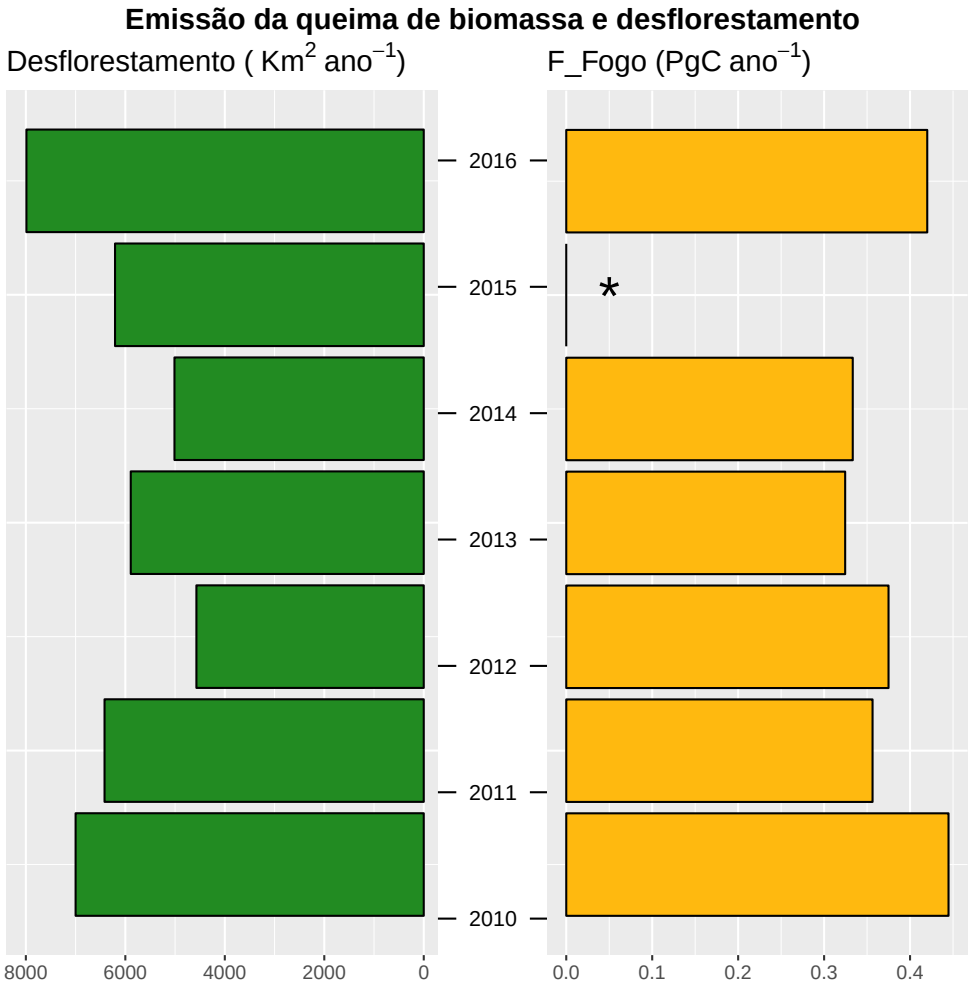


Fonte: Comunicação pessoal de Merriot N. Deeter.

Com relação às emissões por queima de biomassa, em GATTI et al., 2014 foram publicados resultados de emissão para os anos de 2010 e 2011 com valores iguais a 0,51 $\pm$ 0,12 e 0,30 $\pm$ 0,10 PgC ano^{-1} respectivamente. Valores próximos aos aqui determinados, porém com maior emissão ano de 2010. Apesar de ambos os estudos utilizarem a mesma base de dados, foram alteradas a metodologia de cálculo do BKG e a utilização de valores diferentes da razão CO:CO_2 para cada local de amostragem ao invés de um valor único médio para todos os locais de estudo.

Comparando-se os resultados de emissão pela queima de biomassa com os dados de desflorestamento disponibilizados, até então, pelo PRODES (Figura 5.66), vê-se uma clara relação no comportamento de emissão na Amazônia, com exceção ao ano de 2012, quando ocorreram índices maiores de número de focos de queimada em relação a 2011 e 2013 (Figura 5.67), no entanto, com índices menores de desflorestamento.

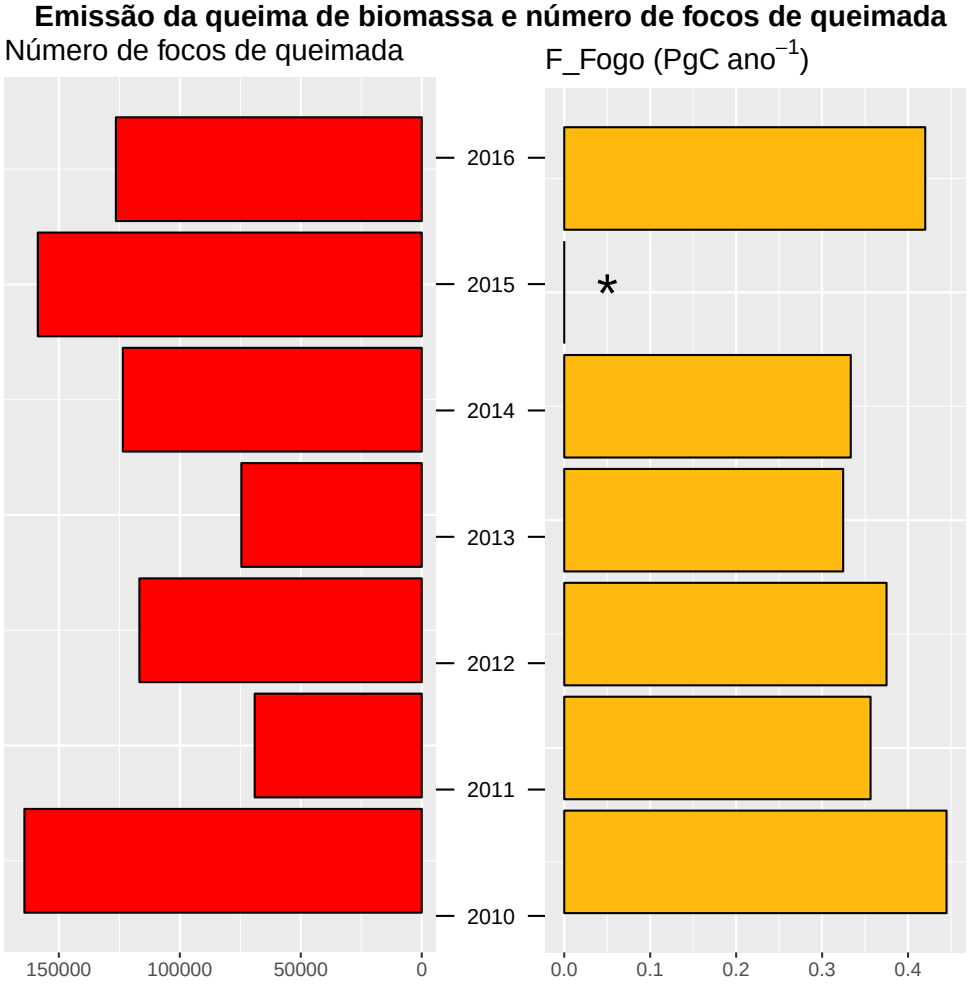
Figura 5.66 - Comparação entre as séries temporais de emissão proveniente da queima de biomassa escalonada à área EVA-florestada e os dados de desflorestamento na Amazônia Legal.



* ano desconsiderado por medidas incompletas.

Fonte: Produção do autor.

Figura 5.67 - Comparação entre as séries temporais de emissão proveniente da queima de biomassa escalonada à área EVA-florestada e os dados de focos de queimada totais na Amazônia Legal.



* ano desconsiderado por medidas incompletas.

Fonte: Produção do autor.

Elevando as emissões a niveis globais, de acordo com o *Global Carbon Project*, a contribuição média em série histórica das emissões oriundas da mudança do uso da terra e do solo (*land use change*) são iguais a 1,2 PgC (LEQUÉRÉ et al., 2018). Realizando-se a média de emissões encontradas nos 4 locais estudados no período de 2010 à 2014, a Amazônia contribuiu com 0,37 $\pm$ 0,15 PgC ano^{-1}, o que representa cerca de um terço das emissões globais. Quando analisamos o período de 2010 a 2016 para os locais estudados de RBA e ALF, observa-se uma contribuição da Amazônia de 0,32 $\pm$ 0,15 PgC ano^{-1}. Ambos os cenários demonstram a Amazônia como uma importante fonte de carbono para a atmosfera devido as queimas de biomassa, representando cerca de 1/3 das emissões globais de LUC.

Estes são dados alarmantes. Em 2014 com estudos relacionados aos anos de 2010 e 2011, GATTI et al., já mencionava que modificações nos padrões de precipitação e temperatura poderiam gerar graves mudanças no comportamento da floresta, reduzindo sua capacidade de absorção de Carbono e exacerbando as emissões desta, fruto da ação antrópica movida pelo desmatamento.

Unindo as informações presentes neste estudo, no qual já observa-se a relação entre temperatura, desflorestamento, disponibilidade de água no solo, focos de queimada e emissão de Carbono, com as recentes e recorrentes notícias sobre o aumento dos índices de queimada e desflorestamento na Amazônia, gera-se um ciclo perigoso à manutenção da floresta, já que as consequências provenientes do desmatamento e de queimadas afetam diretamente os padrões de precipitação, disponibilidade de água no solo e temperatura que, por sua vez, contribuem para o aumento de queimadas e emissão de Carbono. Então o que se testemunha é um processo em andamento de causa e consequência que se fomentam e ganham maiores dimensões com o passar do tempo.

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foram desenvolvidas com sucesso três metodologias:

1. A metodologia para cálculo das concentrações de entrada no continente (BKG) denominada *Air Mass Back-trajectories Method* (AMBaM) que apresentou resultados robustos em comparação aos métodos anteriores utilizados na Amazônia, não apenas quando comparados os resultados da BKG em si mas quando aplicados ao Método de Integração de Coluna, os resultados dos fluxos foram semelhantes, comparando-os à GATTI et al., 2014. Foi realizada uma validação pela comparação dos resultados AMBaM com amostragem realizadas em perfis próximos a costa brasileira (SAH) que mostrou boa concordância. Todos os estudos realizados apoiam a utilização do AMBaM como um método apropriado. Além disso, é uma abordagem de baixo custo utilizando recursos disponíveis e dados de código aberto.

2. Metodologia para o cálculo de variáveis climáticas utilizando os dados de observação provenientes do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

3. Desenvolvimento de metodologia para os cálculo das áreas de influência, que significou um notável avanço em relação à metodologia anterior e a diferenciação das influências das variáveis climáticas por sua localização nos resultados de emissão obtidos. Além disso, com essa metodologia, foi possível a delimitação das áreas de influência por específicos períodos de tempo.

A Amazônia apresentou uma tendência de diminuição dos índices de precipitação quando estudados os três meses mais secos por ano na série histórica a partir de 1970. Estes apresentam-se agravados quando ocorre a presença do fenômeno *El Niño*. Quando analisados os dados de temperatura em série histórica iniciada em 1979, a Amazônia apresentou comportamento de aquecimento, com um aumento da temperatura média em cerca de 1,1 ^{o}C em duas diferentes fontes de dados, provenientes do INMET e ERA-Interim.

Foram encontrados 40 perfis com características de queima de biomassa nos estudos das razões $CO:CO_2$. À partir destes, foram determinados um valor para cada local de amostragem, que possuem um comportamento de forma semicircular no sentido horário, com os menores valores determinados em SAN (46 $\pm$ 9 ppb/ppm), passando por ALF (57 $\pm$ 26 ppb/ppm), RBA (73 $\pm$ 30 ppb/ppm) e findando em TAB/TEF (90 $\pm$ 27 ppb/ppm). Em um resultado médio, foi determinada a razão $CO:CO_2$ para a Amazônia igual a 67 $\pm$ 24 ppb/ppm.

Estes resultados podem ser avaliados de diferentes formas. A primeira, os resultados apresentados nos locais de amostragem presentes na região Leste da Amazônia, demonstra a clara influência de outros biomas que não o Amazônia ou já diagnostica um modificação do bioma presente nestes locais, movida por sua degradação e/ou modificação de espécies de flora. A segunda, o resultado médio determinado para a Bacia Amazônica é comparável ao resultado publicado em 2001 por ANDREAE & MERLET à razão de emissão de Savanas. Além disso, fica evidente a necessidade do monitoramento contínuo das razões, pela sua alta variabilidade em escalas espacial e temporal, fazendo com que, a utilização de uma razão $CO:CO_2$ média para a Amazônia, possa gerar uma interpretação errônea dos resultados de emissão obtidos por meio desta.

Tanto para as razões $CO:CO_2$, quanto para os resultados de emissão pelo monóxido de Carbono e das emissões provenientes da queima de biomassa, os anos com a presença do fenômeno *El Niño*, 2010 e 2016, apresentaram os maiores valores. Ressalta-se que não foram realizadas medidas suficientes para a determinação das emissões para o ano de 2015, no entanto, por meio de outras metodologias e, com os altos valores encontrados nos perfis realizados em novembro e dezembro, acredita-se este ser o ano com as maiores emissões na última década.

A Amazônia apresentou comportamento de aquecimento, com um aumento da temperatura média em cerca de 1,1 ^{o}C em duas diferentes fontes de dados, provenientes do INMET e ERA-Interim e foi observada uma tendência de diminuição da precipitação na estação seca, que pode impactar no aumento de queimadas.

Em estudos de comparação estatística, ficou evidenciada a correlação entre as emissões de Carbono com as variáveis de disponibilidade de água no solo, temperatura e focos de queimada tornando estes os principais ”*drivers*” de emissão de Carbono na área de estudo.

Foi verificado neste estudo uma contribuição média à atmosfera da Amazônia de 39 $\pm$ 16 TgC ano-1 à partir das emissões de CO e de cerca de 0,37 $\pm$ 0,15 PgC ano-1 por meio da queima de biomassa. Comparando-se estes resultados aos publicados por meio do *Global Carbon Project* em 2016, com uma emissão global média de 1,2 PgC ano-1 relativos à mudança do uso da terra e de florestas (*land use change*), conclui-se que a Amazônia, entre os anos de 2010 a 2016, contribuiu com cerca de um terço das emissões globais de carbono por meio da queima de biomassa.

A partir dos dados apresentados, nota-se uma inter-relação de retroalimentação preocupante ocorrendo na Amazônia, a qual se encontra em um ciclo cuja a causa do aumento de emissões pelos seus principais ”*drivers*” têm justamente como consequência o aumento dos mesmos, funcionando como uma ”bola de neve”, aumentando de forma progressiva com o tempo. Assim, a julgar pelas recentes e alarmantes notícias sobre o aumento dos índices de desmatamento, que também mostram correlação com os dados de emissão, e de focos de queimada, fica cada vez mais evidente a necessidade do contínuo monitoramento dos dados de observação na Amazônia, já que mostraram-se ferramentas úteis ao diagnóstico e acompanhamento da situação da floresta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHRENS, D. C. **Essentials of Meteorology**: an invitation to the atmosphere. 6th. ed. [S.l.]: CENGAGE learning, 2012. 1–506 p. Belmont, USA. ISBN 978-0-8400-4933-9. 1

ALDEN, C. B.; MILLER, J. B.; GATTI, L. V.; GLOOR, M. M.; GUAN, K.; MICHALAK, A. M.; LAAN-LUIJKX, I. T. van der; TOUMA, D.; ANDREWS, A.; BASSO, L. S.; CORREIA, C. S. C.; DOMINGUES, L. G.; JOINER, J.; KROL, M. C.; LYAPUSTIN, A. I.; PETERS, W.; SHIGA, Y. P.; THONING, K.; VELDE, I. R. van der; LEEUWEN, T. T. van; YADAV, V.; DIFFENBAUGH, N. S. Regional atmospheric CO2 inversion reveals seasonal and geographic differences in Amazon net biome exchange. **Global Change Biology**, v. 22, n. 10, p. 3427–3443, 2016. ISSN 1365-2486. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1111/gcb.13305>. 38, 54, 73

ANDREAE, M. O.; ARTAXO, P.; BECK, V.; BELA, M.; FREITAS, S.; GERBIG, C.; LONGO, K.; MUNGER, J. W.; WIEDEMANN, K. T.; WOFSY, S. C. Carbon monoxide and related trace gases and aerosols over the Amazon Basin during the wet and dry seasons. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 12, n. 13, p. 6041–6065, jul 2012. ISSN 1680-7324. Disponível em: <http://www.atmos-chem-phys.net/12/6041/2012/>. 5, 15, 16, 17, 42, 44, 53, 78, 80, 88, 94, 110, 111, 114

ANDREAE, M. O.; BROWELL, E. V.; GARSTANG M., G.; L., H. G.; C., H. R.; F., J. G.; J., P. D.; C., S. M.; W., S. G.; W., D. A.; S., T. P. L.; W. TORRES, A. L. R.; WOFSY, S. C. Biomass-burning emissions and associated haze layers over Amazonia. **Journal of Geophysical Research**, v. 93, p. 1509–1527, 1988. 103, 110

ANDREAE, M. O.; MERLET, P. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 15, n. 4, p. 955–966, 2001. ISSN 08866236. 42, 77, 114

ARAGÃO, L. E.; ANDERSON, L. O.; FONSECA, M. G.; ROSAN, T. M.; VEDOVATO, L. B.; WAGNER, F. H.; SILVA, C. V.; Silva Junior, C. H.; ARAI, E.; AGUIAR, A. P.; BARLOW, J.; BERENGUER, E.; DEETER, M. N.; DOMINGUES, L. G.; GATTI, L.; GLOOR, M.; MALHI, Y.; MARENGO, J. A.; MILLER, J. B.; PHILLIPS, O. L.; SAATCHI, S. 21st Century drought-related fires counteract the decline of Amazon deforestation carbon emissions. **Nature Communications**, Springer US, v. 9, n. 1, p. 1–12, 2018. ISSN 20411723. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1038/s41467-017-02771-y>. 6, 7, 16, 17

ARAGÃO, L. E. O. C.; POULTER, B.; BARLOW, J. B.; ANDERSON, L. O.; MALHI, Y.; SAATCHI, S.; PHILLIPS, O. L.; GLOOR, E. Environmental change and the carbon balance of Amazonian forests. **Biological Reviews**, v. 89, n. 4, p. 913–931, 2014. ISSN 1469185X. 71, 74, 91

ARRHENIUS, S. On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature on the ground. **The Philosophical Magazine**, p. 237–276, 1896. 1

ASNER, G. Cloud cover in landsat observations of the brazilian amazon. **International Journal of Remote Sensing**, v. 22, n. 18, p. 3855–3862, 2001. 61

BASSO, L. S. **Determinação da emissão de metano da bacia amazônica.** 2014. 123 p. Tese de Doutorado — Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), São Paulo, 2014. Disponível em: <http://whttp://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85134/tde-23012015-091850/pt-br.php>. Acesso em: 07 jun. 2019. 61

BASSO, L. S.; GATTI, L. V.; GLOOR, M.; MILLER, J. B.; DOMINGUES, L. G.; CORREIA, C. S.; BORGES, V. F. Seasonality and interannual variability of CH 4 fluxes from the eastern Amazon Basin inferred from atmospheric mole fraction profiles. **Journal of Geophysical Research**, v. 121, n. 1, p. 168–184, 2016. ISSN 21562202. 24

BECK, V.; CHEN, H.; GERBIG, C.; BERGAMASCHI, P.; BRUHWILER, L.; HOUWELING, S.; RÖCKMANN, T.; KOLLE, O.; STEINBACH, J.; KOCH, T.; SAPART, C. J.; VEEN, C. van der; FRANKENBERG, C.; ANDREAE, M. O.; ARTAXO, P.; LONGO, K. M.; WOFSY, S. C. Methane airborne measurements and comparison to global models during BARCA. **Journal of Geophysical Research**, v. 117, n. D15, 2012. ISSN 0148-0227. 1

BORGES, V. F. **Determinação da concentração de entrada dos gases de efeito estufa na Bacia Amazônica**. 2013. 107 p. Dissertação de Mestrado — Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), São Paulo, 2013. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85134/tde-19122013-135707/pt-br>. Acesso em: 05 fev. 2018. 31, 34, 61

BORGES, V. F. **CARACTERIZAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DOS GASES DE EFEITO ESTUFA NA COSTA NORTE/NORDESTE DO BRASIL**. 2019. 149 p. Tese de doutorado — Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), São Paulo, 2019. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85134/tde-15082018-145627/pt-br.php>. Acesso em: 05 agosto 2019. 11

BUSTAMANTE, M. M. C.; ROITMAN, I.; AIDE, T. M.; ALENCAR, A.; ANDERSON, L. O.; ARAGÃO, L.; ASNER, G. P.; BARLOW, J.; BERENGUER, E.; CHAMBERS, J.; COSTA, M. H.; FANIN, T.; FERREIRA, L. G.; FERREIRA, J.; KELLER, M.; MAGNUSSON, W. E.; MORALES-BARQUERO, L.; MORTON, D.; OMETTO, J. P. H. B.; PALACE, M.; PERES, C. A.; SILVÉRIO, D.; TRUMBORE, S.; VIEIRA, I. C. G. Toward an integrated monitoring framework to assess the effects of tropical forest degradation and recovery on carbon stocks and biodiversity. **Global Change Biology**, v. 22, n. 1, p. 92–109, 2016. ISSN 13652486. 16

CHOU W.W., S. W. R. H. J. L. C. G.; SACHSE, G. Net fluxes of CO2 in Amazonia derived from aircraft observations. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, p. 4614, 2002. 6, 34, 42

CIAIS, P.; SABINE, C.; BALA, G.; BOPP, L.; BROVKIN, V.; CANADELL, J.; CHHABRA, A.; DEFRIES, R.; GALLOWAY, J.; HEIMANN, M.; JONES, C.; QUERE, C. L.; MYNENI, R.; PIAO, S.; THORNTON, P. Book Section chapter 6. **Carbon and Other Biogeochemical Cycles**. USA: Cambridge University Press, 2013. 465–570 p. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. ISBN ISBN 978-1-107-66182-0. 2

CONRAD, R. and SEILER, W. Influence of temperature, moisture and organica carbon on the flux of H2 and CO between soil and atmosphere: filed studies in subtropical regions. **Journal Geophysics Research**, v. 90, p. 5699–5709, 1985. 44

CORREIA, C. S. de C. **Estudo da emissão/absorção de N2O da bacia Amazônica.** 2013. 82 p. Dissertação de Mestrado — Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), São Paulo, 2013. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85134/tde-17112015-101523/pt-br.php>. Acesso em: 05 fev. 2018. 17, 61

CROWLEY, J. W.; MITROVICA, J. X.; BAILEY, R. C.; TAMISIEA, M. E.; DAVIS, J. L. Annual variations in water storage and precipitation in the Amazon Basin: Bounding sink terms in the terrestrial hydrological balance using GRACE satellite gravity data. **Journal of Geodesy**, v. 82, n. 1, p. 9–13, 2008. ISSN 09497714. 121

CRUTZEN, P. J.; ANDREAE, M. O. Biomass burning in the tropics: Impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles. **Science**, American Association for the Advancement of Science, v. 250, n. 4988, p. 1669–1678, 1990. ISSN 0036-8075. 16

D'AMELIO, M. T. S.; GATTI, L. V.; MILLER, J. B.; TANS, P. Regional N₂O fluxes in Amazonia derived from aircraft vertical profiles. **Atmospheric Chemistry and Physics Discussions**, v. 9, p. 17429–17463, 2009. ISSN 1680-7316. 11

DEE, D. P.; UPPALA, S. M.; SIMMONS, A. J.; BERRISFORD, P.; POLI, P.; KOBAYASHI, S.; ANDRAE, U.; BALMASEDA, M. A.; BALSAMO, G.; BAUER, P.; BECHTOLD, P.; BELJAARS, A. C.; BERG, L. van de; BIDLOT, J.; BORMANN, N.; DELSOL, C.; DRAGANI, R.; FUENTES, M.; GEER, A. J.; HAIMBERGER, L.; HEALY, S. B.; HERSBACH, H.; HÓLM, E. V.; ISAKSEN, L.; KÅLLBERG, P.; KÖHLER, M.; MATRICARDI, M.; MCNALLY, A. P.; MONGE-SANZ, B. M.; MORCRETTE, J. J.; PARK, B. K.; PEUBEY, C.; ROSNAY, P. de; TAVOLATO, C.; THÉPAUT, J. N.; VITART, F. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 137, n. 656, p. 553–597, 2011. ISSN 00359009. 51

DEETER, M. N.; MARTÍNEZ-ALONSO, S.; GATTI, L. V.; GLOOR, M.; MILLER, J. B.; DOMINGUES, L. G.; CORREIA, C. S. C. Validation and Analysis of MOPITT CO Observations of the Amazon Basin. **Atmospheric Measurement Techniques Discussions**, p. 1–26, 2016. ISSN 1867-8610. 7, 16, 138

DOMINGUES, L. G. **Estudo do papel da Bacia Amazônica na emissão/absorção de dióxido de carbono durante o ano de 2010.** 2013. 118 p. Dissertação de Mestrado — Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), São Paulo, 2013. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85134/tde-16012013-094446/pt-br>. Acesso em: 05 fev. 2018. 17, 25, 26, 31, 33, 35, 61, 78, 129

DUNCAN, B. N.; LOGAN, J. A. Model analysis of the factors regulating the trends and variability of carbon monoxide be- tween 1988 and 1997. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 8, p. 7389—-7403, 2008. 78

DUNCAN, B. N.; LOGAN, J. A.; BEY, I.; MEGRETSKAIA, I. A.; YAN-TOSCA, R. M.; NOVELLI, P. C.; JONES, N. B.; RINSLAND, C. P. Global budget of CO, 1988-1997: Source estimates and vali- dation with a global model. **Journal of Geophysical Research**, v. 112, 2007. 78

EVA, H. D.; HUBER, O. **A Proposal for defining the geographical boundaries of Amazonia**. Itália: Office for Official Publications of the European Communities, 2005. 1–40 p. ISSN 1831-9424. 119, 120

FEARNSIDE, P. M. Deforestation in Brazilian Amazonia: History, rates, and consequences. **Conservation Biology**, v. 19, n. 3, p. 680–688, 2005. ISSN 08888892. 6, 16

FELIPPE, M. T. S. D. **Estudo de fluxo de óxido nitroso (N2O) regional na Bacia Amazônica**. 2010. 140 p. Tese de Doutorado — Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), São Paulo, 2010. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85134/tde-12082011-145420/pt-br.php>. Acesso em: 10 jul. 2019. 103

FEREK, R. J.; REID, J. S.; HOBBS, P. V.; BLAKE, D. R.; LIOUSSE, C. Emission factors of hydrocarbons, halocarbons, trace gases and particles from biomass burning in Brazil. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v. 103, n. D24, p. 32107–32118, 1998. 88, 95, 103, 110

GATTI, L.; GLOOR, M.; MILLER, J.; DOUGHTY, C.; MALHI, Y.; DOMINGUES, L.; BASSO, L.; MARTINEWSKI, A.; CORREIA, C.; BORGES, V.; FREITAS, S.; BRAZ, R.; ANDERSON, L.; ROCHA, H.; GRACE, J.; PHILLIPS, O.; LLOYD, J. Drought sensitivity of Amazonian carbon balance revealed by atmospheric measurements. **Nature**, v. 506, n. 7486, 2014. ISSN 00280836. xiv, 5, 15, 16, 17, 36, 38, 39, 42, 43, 44, 53, 56, 60, 72, 73, 75, 77, 78, 116, 129, 138, 141, 142

GATTI, L. V.; MILLER, J. B.; D'AMELIO, M. T. S.; MARTINEWSKI, a.; BASSO, L. S.; GLOOR, M. E.; WOFSY, S.; TANS, P. Vertical profiles of CO2 above eastern Amazonia suggest a net carbon flux to the atmosphere and balanced biosphere between 2000 and 2009. **Tellus B**, v. 62, n. 5, p. 581–594, nov 2010. ISSN 02806509. Disponível em: <http://www.tellusb.net/index.php/tellusb/article/view/16606>. 11, 15, 17, 34, 36, 38, 42, 44, 53, 55, 73, 77, 78, 108, 109, 121, 129

GERBIG, C.; LIN, J. C.; WOFSY, S. C.; DAUBE, B. C.; ANDREWS, A. E.; STEPHENS, B. B.; BAKWIN, P. S.; GRAINGER, C. A. Toward constraining regional-scale fluxes of CO2 with atmospheric observations over a continent: 2. Analysis of COBRA data using a receptor-oriented framework. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 108, n. D24, 2003. ISSN 01480227. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1029/2003JD003770>. 53

GIBBS, H. K.; BROWN, S.; NILES, J. O.; FOLEY, J. a. Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks: making REDD a reality. **Environmental Research Letters**, v. 2, n. 4, p. 045023, 2007. ISSN 1748-9326. 14

GIGLIO, L.; RANDERSON, J. T.; WERF, G. R. van der. Analysis of daily, monthly, and annual burned area using the fourth-generation global fire emissions database (gfed4). **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 118, n. 1, p. 317–328, 2013. vi, 11, 12

GLOOR, E.; WILSON, C.; CHIPPERFIELD, M. P.; CHEVALLIER, F.; BUERMANN, W.; BOESCH, H.; PARKER, R.; SOMKUTI, P.; GATTI, L. V.; CORREIA, C.; DOMINGUES, L. G.; PETERS, W.; MILLER, J.; DEETER, M. N.; SULLIVAN, M. J. Tropical land carbon cycle responses to 2015/16 El Niño as recorded by atmospheric greenhouse gas and remote sensing data. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 373, n. 1760, 2018. 74, 75

GLOOR, M.; DLUGOKENCKY, E.; BRENNINKMEIJER, C.; HOROWITZ, L.; HURST, D. F.; DUTTON, G.; CREVOISIER, C.; MACHIDA, T.; TANS, P. Three-dimensional sf 6 data and tropospheric transport simulations : Signals , modeling accuracy , and implications for inverse modeling. **Journal of Geophysical Research**, v. 112, p. 1–17, 2007. 38

GLOOR, M.; GATTI, L.; BRIENEN, R.; FELDPAUSCH, T. R.; PHILLIPS, O. L.; MILLER, J.; OMETTO, J. P.; ROCHA, H.; BAKER, T.; De Jong, B.; HOUGHTON, R. A.; MALHI, Y.; C. Aragão, L. E. O.; GUYOT, J. L.; ZHAO, K.; JACKSON, R.; PEYLIN, P.; SITCH, S.; POULTER, B.; LOMAS, M.; ZAEHLE, S.; HUNTINGFORD, C.; LEVY, P.; LLOYD, J. The carbon balance of South America: A review of the status, decadal trends and main determinants. **Biogeosciences**, v. 9, n. 12, p. 5407–5430, 2012. ISSN 17264170. 6, 13, 15, 16

GUYON, P.; FRANK, G. P.; WELLING, M.; CHAND, D.; ARTAXO, P.; RIZZO, L.; NISHIOKA, G.; KOLLE, O.; FRITSCH, H.; Silva Dias, M. A. F.; GATTI, L. V.; CORDOVA, A. M.; ANDREAE, M. O. Airborne measurements of trace gas and aerosol particle emissions from biomass burning in Amazonia. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 5, n. 11, p. 2989–3002, nov 2005. 17, 110, 114

HOUGHTON, R. A.; HOUSE, J. I.; PONGRATZ, J.; Van Der Werf, G. R.; DEFRIES, R. S.; HANSEN, M. C.; Le Quéré, C.; RAMANKUTTY, N. Carbon emissions from land use and land-cover change. **Biogeosciences**, v. 9, n. 12, p. 5125–5142, 2012. ISSN 17264170. vi, 11, 12, 16

HYSPLIT AIR RESOURCES LABORATORY. 2018. Disponível em: <https://www.ready.noaa.gov/documents/Tutorial/html/traj_vert.html>. Acesso em: 05 de Fevereiro 2019. 39, 45

IHAKA, R.; GENTLEMAN, R. R: A Language for Data Analysis and Graphics. **Journal of Computational and Graphical Statistics**, v. 5, n. 3, p. 299, sep 1996. ISSN 10618600. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/1390807{%}5Cnhttp://www.jstor.org/stable/1390807?seq=1{&}cid=pdf-reference{#}references{_}tab{_}contents{%}5Cnhttp://about.jstor.org/termshttp://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10618600.1996.10474713https://www.jstor.org/stable/13908>. 42

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA). **Plano Amazônia Sustentável – PAS**. 2008. Disponível em: <http://www.casacivil.gov.br/.arquivos/110106%20-%20MI%20-%20Plano%20Amazonia%20Sustentavel%20-%20PAS.pdf>. Acesso em: 11 de Julho 2019. 79

INSTITUTO DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA (IPAM). **Arco do Desmatamento**. 2019. Disponível em: <https://ipam.org.br/glossario/arco-do-desmatamento/>. Acesso em: 11 de Julho 2019. 78

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET (A). 2017. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesautomaticas>. Acesso em: 21 de Novembro 2017. 49

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET (B). 2017. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesconvencionais>. Acesso em: 21 de Novembro 2017. 49

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). 2018. Disponível em: <http://www.inpe.br/queimadas/portal>. Acesso em: 07 de Fevereiro 2018. 77

IPCC. **Climate Change 2007 - The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2007. ISBN 0521705967. 2, 3, 17

IPCC. **Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**: Summary for Policymakers. [S.l.]: IPCC, 2014. 1–151 p. Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.). Geneva, Switzerland. ISSN 1476-4687. 1, 5, 17

KAUFMAN, J. B.; CUMMINGS, D. L.; WARD, D. E.; BABBITT, R. Fire in the Brazilian Amazon: Biomass, nutrient pools, and losses in slashed primary forests. **Oecologia**, v. 104, p. 397–408, 1995. 16

KESSELMEIER, J.; KUHN, U.; ROTTENBERGER, S.; BIESENTHAL, T.; WOLF, A.; SCHEBESKE, G.; ANDREAE, M. O.; CICCIOLI, P.; BRANCALEONI, E.; FRATTONI, M.; OLIVA, S. T.; BOTELHO, M. L.; SILVA, C. M.; TAVARES, T. M. Concentrations and species composition of atmospheric volatile organic compounds (VOCs) as observed during the wet and dry season in Rondônia (Amazonia). **Journal of Geophysical Research D: Atmospheres**, v. 107, n. 20, p. 1–13, 2002. ISSN 01480227. 129

KIRCHHOFF, H. and MARINHO, A. Surface carbon monoxide measurements in amazonia. **Journal of Geophysical Research**, v. 95, p. 16933–16943, 1990. 44

KOREN, G.; SCHAIK, E. van; ARAÚJO, A. C.; BOERSMA, K. F.; GÄRTNER, A.; KILLAARS, L.; KOOREMAN, M. L.; KRUIJT, B.; LAAN-LUIJKX, I. T. van der; RANDOW, C. von; SMITH, N. E.; PETERS, W. Widespread reduction in sun-induced fluorescence from the Amazon during the 2015/2016 El Niño. **Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences**, v. 373, n. 1760, 2018. ISSN 14712970. 73

KUHN, U.; ANDREAE, M. O.; ARAúJO, A. C.; BRANCALEONI, E.; CICCIOLI, P.; DINDORF, T.; FRATTONI, M.; GATTI, L. V.; GANZEVELD, L.; KRUIJT, B.; LELIEVELD, J.; LLOYD, J.; MEIXNER, F. X.; NOBRE, A. D.; POSCHL, U.; SPIRIG, C.; STEFANI, P.; THIELMANN, A.; VALENTINI, R.; KESSELMEIER, J. Isoprene and monoterpene fluxes from central amazonian rainforest inferred from tower-based and airborne measurements, and implications on the atmospheric chemistry and the local carbon budget. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 7, p. 2855–2879, 2007. Disponível em: <www.atmos-chem-phys.net/7/2855/2007/>. 44, 129

KUHN, U.; GANZEVELD, L.; THIELMANN, A.; DINDORF, T.; SCHEBESKE, G.; WELLING, M.; SCIARE, J.; ROBERTS, G.; MEIXNER, F. X.; KESSELMEIER, J.; LELIEVELD J., K. O.; CICCIOLI, P.; LLOYD, J.; TRENTMANN, J.; ARTAXO, P.; ANDREAE, M. O. Impact of Manaus City on the Amazon Green Ocean atmosphere: ozone production, precursor sensitivity and aerosol load. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 10, p. 9251—9282, 2010. 110, 111

LAAN-LUIJKX, I. T. van der; KROL, M. C.; GATTI, L. V.; DOMINGUES, L. G.; CORREIA, C. S. C.; MILLER, J. B.; GLOOR, M.; LEEUWEN, T. T.; KAISER, J. W.; WIEDINMYER, C.; BASU, S.; CLERBAUX, C.; PETERS, W. Response of the Amazon carbon balance to the 2010 drought derived with CarbonTracker South America. **Global Biogeochemical Cycles**, p. 1092–1108, 2015. 73

LEEUWEN, T. T. van; WERF, G. R. van der. Spatial and temporal variability in the ratio of trace gases emitted from biomass burning. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 11, n. 8, p. 3611–3629, apr 2011. ISSN 1680-7324. 15

LEQUÉRÉ, C.; ANDREW, R. M.; CANADELL, J. G.; SITCH, S.; Ivar Korsbakken, J.; PETERS, G. P.; MANNING, A. C.; BODEN, T. A.; TANS, P. P.; HOUGHTON, R. A.; KEELING, R. F.; ALIN, S.; ANDREWS, O. D.; ANTHONI, P.; BARBERO, L.; BOPP, L.; CHEVALLIER, F.; CHINI, L. P.; CIAIS, P.; CURRIE, K.; DELIRE, C.; DONEY, S. C.; FRIEDLINGSTEIN, P.; GKRITZALIS, T.; HARRIS, I.; HAUCK, J.; HAVERD, V.; HOPPEMA, M.; Klein Goldewijk, K.; JAIN, A. K.; KATO, E.; KÖRTZINGER, A.; LANDSCHÜTZER, P.; LEFÈVRE, N.; LENTON, A.; LIENERT, S.; LOMBARDOZZI, D.; MELTON, J. R.; METZL, N.; MILLERO, F.; MONTEIRO, P. M.; MUNRO, D. R.; NABEL, J. E.; NAKAOKA, S. I.; O'BRIEN, K.; OLSEN, A.; OMAR, A. M.; ONO, T.; PIERROT, D.; POULTER, B.; RÖDENBECK, C.; SALISBURY, J.; SCHUSTER, U.; SCHWINGER, J.; SÉFÉRIAN, R.; SKJELVAN, I.; STOCKER, B. D.; SUTTON, A. J.; TAKAHASHI, T.; TIAN, H.; TILBROOK, B.; Van Der Laan-Luijkx, I. T.; Van Der Werf, G. R.; VIOVY, N.; WALKER, A. P.; WILTSHIRE, A. J.; ZAEHLE, S. Global Carbon Budget 2016. **Earth System Science Data**, v. 8, n. 2, p. 605–649, 2016. ISSN 18663516. vi, 9, 10, 11, 12

LEQUÉRÉ, C.; ANDREW, R. M.; FRIEDLINGSTEIN, P.; SITCH, S.; HAUCK, J.; PONGRATZ, J.; PICKERS, P. A.; KORSBAKKEN, J. I.; PETERS, G. P.; CANADELL, J. G.; ARNETH, A.; ARORA, V. K.; BARBERO, L.; BASTOS, A.; BOPP, L.; CHEVALLIER, F.; CHINI, L. P.; CIAIS, P.; DONEY, S. C.; GKRITZALIS, T.; GOLL, D. S.; HARRIS, I.; HAVERD, V.; HOFFMAN, F. M.; HOPPEMA, M.; HOUGHTON, R. A.; HURTT, G.; ILYINA, T.; JAIN, A. K.; JOHANNESSEN, T.; JONES, C. D.; KATO, E.; KEELING, R. F.; GOLDEWIJK, K. K.; LANDSCHÜTZER, P.; LEFÈVRE, N.; LIENERT, S.; LIU, Z.; LOMBARDOZZI, D.; METZL, N.; MUNRO, D. R.; NABEL, J. E. M. S.; NAKAOKA, S.-I.; NEILL, C.; OLSEN, A.; ONO, T.; PATRA, P.; PEREGON, A.; PETERS, W.; PEYLIN, P.; PFEIL, B.; PIERROT, D.; POULTER, B.; REHDER, G.; RESPLANDY, L.; ROBERTSON, E.; ROCHER, M.; RÖDENBECK, C.; SCHUSTER, U.; SCHWINGER, J.; SÉFÉRIAN, R.; SKJELVAN, I.; STEINHOFF, T.; SUTTON, A.; TANS, P. P.; TIAN, H.; TILBROOK, B.; TUBIELLO, F. N.; LAAN-LUIJKX, I. T. van der; WERF, G. R. van der; VIOVY, N.; WALKER, A. P.; WILTSHIRE, A. J.; WRIGHT, R.; ZAEHLE, S.; ZHENG, B. Global carbon budget 2018. **Earth System Science Data**, v. 10, n. 4, p. 2141–2194, 2018. Disponível em: <https://www.earth-syst-sci-data.net/10/2141/2018/>. 9, 10, 11, 140

LEQUÉRÉ, C.; MORIARTY, R.; ANDREW, R. M.; PETERS, G. P.; CIAIS, P.; FRIEDLINGSTEIN, P.; JONES, S. D.; SITCH, S.; TANS, P.; ARNETH, A.; BODEN, T. A.; BOPP, L.; BOZEC, Y.; CANADELL, J. G.; CHINI, L. P.; CHEVALLIER, F.; COSCA, C. E.; HARRIS, I.; HOPPEMA, M.; HOUGHTON, R. A.; HOUSE, J. I.; JAIN, A. K.; JOHANNESSEN, T.; KATO, E.; KEELING, R. F.; KITIDIS, V.; GOLDEWIJK, K. K.; KOVEN, C.; LANDA, C. S.; LANDSCHÜTZER, P.; LENTON, A.; LIMA, I. D.; MARLAND, G.; MATHIS, J. T.; METZL, N.; NOJIRI, Y.; OLSEN, A.; ONO, T.; PENG, S.; PETERS, W.; PFEIL, B.; POULTER, B.; RAUPACH, M. R.; REGNIER, P.; RÖDENBECK, C.; SAITO, S.; SALISBURY, J. E.; SCHUSTER, U.; SCHWINGER, J.; SÉFÉRIAN, R.; SEGSCHNEIDER, J.; STEINHOFF, T.; STOCKER, B. D.; SUTTON, A. J.; TAKAHASHI, T.; TILBROOK, B.; WERF, G. R. van der; VIOVY, N.; WANG, Y.-P.; WANNINKHOF, R.; WILTSHIRE, A.; ZENG, N. Global carbon budget 2014. **Earth System Science Data**, v. 7, n. 1, p. 47–85, 2015. 2, 5

LI, W.; FU, R.; DICKINSON, R. E. Rainfall and its seasonality over the Amazon in the 21st century as assessed by the coupled models for the IPCC AR4. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v. 111, n. 2, p. 1–14, 2006. 71

LOGAN, J. A.; PRATHER, M. J.; WOFSY, S. C.; MCELROY, M. B. Tropospheric chemistry: A global perspective. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 86, n. C8, p. 7210–7254, 1981. 15

MALHI, Y. The carbon balance of tropical forest regions, 1990–2005. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, Elsevier B.V., v. 2, n. 4, p. 237–244, oct 2010. ISSN 18773435. 14

MALHI, Y.; PHILLIPS, O.; LLOYD, J.; BAKER, T.; WRIGHT, J.; ALMEIDA, S.; ARROYO, L.; FREDERIKSEN, T.; GRACE, J.; HIGUCHI, N.; KILLEEN, T.; LAURANCE, W.; LEAÑO, C.; LEWIS, S.; MEIR, P.; MONTEAGUDO, a.; NEILL, D.; Núñez Vargas, P.; PANFIL, S.; PATIÑO, S.; PITMAN, N.; QUESADA, C.; RUDAS-LL., a.; SALOMÃO, R.; SALESKA, S.; SILVA, N.; SILVEIRA, M.; SOMBROEK, W.; VALENCIA, R.; Vásquez Martínez, R.; VIEIRA, I.; VINCETI, B. An international network to monitor the structure, composition and dynamics of Amazonian forests (RAINFOR). **Journal of Vegetation Science**, v. 13, n. 3, p. 439, 2002. ISSN 1100-9233. 2

MARTIN, M. V.; LOGAN, J. A.; KAHN, R. A.; LEUNG, F. Y.; NELSON, D. L.; DINER, D. J. Smoke injection heights from fires in North America: analysis of 5 years of satellite observations. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 10, p. 1491—-1510, 2010. 16

MCT. **COMUNICAÇÃO NACIONAL INICIAL DO BRASIL À CONVENÇÃO-QUADRO DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE MUDANÇA DO CLIMA**. [S.l.]: Ministério da Ciência e Tecnologia, 2004. 12

MCT. **Segunda Comunicação Nacional à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima**. [S.l.]: Ministério da Ciência e Tecnologia, 2010. 13

MCTI. **Terceira Comunicação Nacional à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima**. [S.l.]: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2016. 12, 13, 14

MILLER, J. B.; GATTI, L. V.; D'AMELIO, M. T.; 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**, v. 34, n. 10, 2007. ISSN 00948276. 7, 34, 38, 53, 85

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Mapas de Cobertura Vegetal dos Biomas Brasileiros**. 2007. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/203/_arquivos/8_mapas_coberturavegetal_203.pdf>. 82

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Amazônia**. 2019. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/informma/item/824-amazC3B4nia.html>. Acesso em: 11 de Julho 2019. 78

MOLEN, M. van der; DOLMAN, A.; CIAIS, P.; EGLIN, T.; GOBRON, N.; LAW, B.; MEIR, P.; PETERS, W.; PHILLIPS, O.; REICHSTEIN, M.; CHEN, T.; DEKKER, S.; DOUBKOVá, M.; FRIEDL, M.; JUNG, M.; HURK, B. van den; JEU, R. de; KRUIJT, B.; OHTA, T.; REBEL, K.; PLUMMER, S.; SENEVIRATNE, S.; SITCH, S.; TEULING, A.; WERF, G. van der; WANG, G. Drought and ecosystem carbon cycling. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 151, n. 7, p. 765 – 773, 2011. ISSN 0168-1923. 72

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **Global Climate Change**. 2017. Disponível em: <https://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature/>. Acesso em: 04 de Setembro 2018. 76

NETER, J.; WASSERMAN, W.; KUTNER, M. H.; L., W. Chicago: [s.n.], 2005. 52

NOAA. **ESRL - Carbon Dioxide at NOAA's Mauna Loa Observatory reaches new milestone: Tops 400 ppm**. 2013. Disponível em: <https://www.esrl.noaa.gov/news/2013/CO2400.html>. Acesso em: 10 de Agosto 2019. 17, 18

NOAA. **National Oceanic and Atmospheric Administration**. 2016. Disponível em: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/aircraft/sampling.html>. Acesso em: 04 de Fevereiro 2019. 22, 23, 28

NOAA. **ESRL - Global Monitoring Division**. 2019. Disponível em: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>. Acesso em: 10 de Agosto 2019. 18

NOAA. **ESRL - Physical Sciences Division - Multivariate ENSO Index Version 2**. 2019. Disponível em: <https://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/>. Acesso em: 10 de Agosto 2019. 19

OLIVIER, J. G. J.; BOUWMAN, A. F.; BERDOWSKI, J. J. M.; VELDT, C.; BLOOS, J. P. J. Sectoral emission inventories of greenhouse gases for 1990 on a per country basis as well as on 1x1. **Environmental Science & Policy**, v. 2, 1999. 37

PHILLIPS, O. L.; ARAGÃO, L. E.; LEWIS, S. L.; FISHER, J. B.; LLOYD, J.; LÓPEZ-GONZÁLEZ, G.; MALHI, Y.; MONTEAGUDO, A.; PEACOCK, J.; QUESADA, C. A.; Van Der Heijden, G.; ALMEIDA, S.; AMARAL, I.; ARROYO, L.; AYMARD, G.; BAKER, T. R.; BÁNKI, O.; BLANC, L.; BONAL, D.; BRANDO, P.; CHAVE, J.; De Oliveira, Á. C. A.; CARDOZO, N. D.; CZIMCZIK, C. I.; FELDPAUSCH, T. R.; FREITAS, M. A.; GLOOR, E.; HIGUCHI, N.; JIMÉNEZ, E.; LLOYD, G.; MEIR, P.; MENDOZA, C.; MOREL, A.; NEILL, D. A.; NEPSTAD, D.; PATIÑO, S.; PEÑUELA, M. C.; PRIETO, A.; RAMÍREZ, F.; SCHWARZ, M.; SILVA, J.; SILVEIRA, M.; THOMAS, A. S.; STEEGE, H. T.; STROPP, J.; VÁSQUEZ, R.; ZELAZOWSKI, P.; DÁVILA, E. A.; ANDELMAN, S.; ANDRADE, A.; CHAO, K. J.; ERWIN, T.; Di Fiore, A.; HONORIO, E. C.; KEELING, H.; KILLEEN, T. J.; LAURANCE, W. F.; CRUZ, A. P.; PITMAN, N. C.; VARGAS, P. N.; RAMÍREZ-ANGULO, H.; RUDAS, A.; SALAMÃO, R.; SILVA, N.; TERBORGH, J.; TORRES-LEZAMA, A. Drought sensitivity of the amazon rainforest. **Science**, v. 323, n. 5919, p. 1344–1347, 2009. ISSN 10959203. 71

PRODES. **Relatório do Projeto de Monitoramento do Desflorestamento na Amazônia Legal 2011**. 2011. Disponível em: <http://www.obt.inpe.br/prodes/RelatorioProdes2011.pdf>. Acesso em: 23 de Julho 2017. 6

R Core Team. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. Vienna, Austria, 2013. Disponível em: <http://www.R-project.org/>. 42

REGALADO, A. Brazil says rate of deforestation in Amazonia continues to plunge. **Science**, v. 329, p. 1270–1271, 2010. 6

RIBEIRO, I. O.; ANDREOLI, R. V.; KAYANO, M. T.; SOUSA, T. R.; MEDEIROS, A. S.; GODOI, R. H.; GODOI, A. F.; DUVOISIN, S.; MARTIN, S. T.; SOUZA, R. A. Biomass burning and carbon monoxide patterns in Brazil during the extreme drought years of 2005, 2010, and 2015. **Environmental Pollution**, v. 243, p. 1008–1014, 2018. ISSN 18736424. 73

SAATCHI, S. S.; HARRIS, N. L.; BROWN, S.; LEFSKY, M.; MITCHARD, E. T. a.; SALAS, W.; ZUTTA, B. R.; BUERMANN, W.; LEWIS, S. L.; HAGEN, S.; PETROVA, S.; WHITE, L.; SILMAN, M.; MOREL, A. Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 108, n. 24, p. 9899–904, 2011. ISSN 1091-6490. 14

SCHADE, G. W. and CRUTZEN, P. J. CO emissions from degrading plant matter (II) – Estimate of a global source strength. **Tellus**, v. 51B, p. 909–918, 1999. 44

SCHNEIDER, S. H. The greenhouse Effect: Science and Policy. **Science**, v. 243, p. 771—-781, 1989. 1

SCHOBER, P.; SCHWARTE, L. A. Correlation coefficients: Appropriate use and interpretation. **Anesthesia and Analgesia**, v. 126, n. 5, p. 1763–1768, 2018. ISSN 15267598. 52

SHIMABUKURO, Y. E.; PEREIRA, G.; CARDOZO, F. S.; STOCKLER, R.; FREITAS, S. R.; COURA, S. M. C. **Biomass burning emission esti- mation in Amazon tropical forest**. 1. ed. [S.l.]: Taylor and Francis Group, 2013. 16

STEPHENS, G. L.; LI, J.; WILD, M.; CLAYSON, C. A.; LOEB, N.; KATO, S.; L'ECUYER, T.; STACKHOUSE, P. W.; LEBSOCK, M.; ANDREWS, T. An update on Earth's energy balance in light of the latest global observations. **Nature Geoscience**, Nature Publishing Group, v. 5, n. 10, p. 691–696, 2012. ISSN 17520894. 2

SWENSON, S.; WAHR, J. Methods for inferring regional surface-mass anomalies from gravity recovery and climate experiment (grace) measurements of time-variable gravity. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 107, n. B9, p. ETG 3–1–ETG 3–13, 2002. 121

TARR, M. A.; MILLER, W. L.; ZEPP, R. G. Direct carbon monoxide photoproduction from plant matter. **Journal of Geophysical Research**, v. 100, p. 11403–11413, 1995. 44

THE GUARDIAN. **Climate Change Consensus**. 2019. Disponível em: <https://www.theguardian.com/environment/climate-consensus-97-per-cent/2013/may/16/climate-change-scienceofclimatechange>. Acesso em: 04 de Agosto 2019. 4

WARD, D. E.; SETZER, A. W.; KAUFMAN, Y. J.; RASMUSSEN, R. A. Characteristics of smoke emissions from biomass fires of the Amazon region – BASE-A experiment, in: Global Biomass Burning: Atmospheric, Climatic, and Biospheric Implications. **MIT Press**, p. 394—402, 1991. 110

WERF, G. R. van der; RANDERSON, J. T.; GIGLIO, L.; COLLATZ, G. J.; KASIBHATLA, P. S.; Arellano, A. F., J. Interannual variability in global biomass burning emissions from 1997 to 2004. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 6, n. 11, p. 3423–3441, 2006. ISSN 16807375. 78

WMO. **The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2015**. World Meteorological Organization, 2016. Disponível em: <https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=3084>. Acesso em: 04 de Agosto 2019. 17, 18, 19, 20

WMO. **WMO WDCGG DATA SUMMARY, n42**. Japan Meteorological Agency in co-operation with World Meteorological Organization, 2018. Disponível em: <https://gaw.kishou.go.jp/static/publications/summary/sum42/sum42.pdf>. 15, 16

YOKELSON, R. J.; CHRISTIAN, T. J.; KARL, T. G.; GUENTHER, A. The tropical forest and fire emissions experiment: laboratory fire measurements and synthesis of campaign data. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 8, n. 13, p. 3509–3527, 2008. Disponível em: <https://www.atmos-chem-phys.net/8/3509/2008/>. 17

YURGANOV, L.; MCMILLAN, W.; GRECHKO, E.; DZHOLA, A. Analysis of global and regional co burdens measured from space between 2000 and 2009 and validated by ground-based solar tracking spectrometers. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 10, n. 8, p. 3479–3494, 2010. Disponível em: <https://www.atmos-chem-phys.net/10/3479/2010/>. 15

8 ANEXO A - DATAS DOS PERFIS

Tabela 8.1 - Datas dos perfis verticais realizados no local de amostragem ALF.

2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
27/01/10	24/01/11	20/01/12	17/01/13	12/03/14	13/01/15	23/02/16
17/02/10	01/03/11	28/01/12	31/01/13	29/03/14	27/01/15	29/02/16
01/03/10	25/03/11	17/02/12	15/02/13	16/04/14	21/02/15	13/03/16
14/03/10	16/04/11	27/02/12	28/02/13	29/04/14	28/02/15	30/03/16
28/04/10	17/05/11	09/03/12	13/03/13	14/05/14	23/03/15	17/04/16
13/05/10	19/06/11	21/03/12	27/03/13	31/05/14		29/04/16
30/05/10	28/06/11	13/04/12	15/04/13	18/06/14		18/05/16
18/06/10	20/07/11	26/04/12	30/04/13	30/06/14		06/06/16
09/07/10	30/07/11	16/05/12	14/05/13	16/07/14		14/07/16
30/07/10	23/08/11	29/05/12	28/05/13	29/07/14		20/07/16
13/08/10	31/08/11	15/06/12	17/06/13	11/08/14		07/08/16
30/08/10	17/09/11	27/06/12	28/06/13	29/08/14		22/08/16
14/09/10	28/09/11	16/07/12	16/07/13	29/09/14		03/09/16
28/09/10	24/10/11	28/07/12	31/07/13	15/10/14		19/09/16
13/10/10	02/11/11	13/08/12	14/08/13	29/10/14		06/10/16
28/10/10	27/11/11	27/08/12	31/08/13	12/12/14		18/10/16
14/11/10	18/12/11	13/09/12	22/09/13	30/12/14		02/11/16
30/11/10	30/12/11	28/09/12	02/10/13			23/11/16
30/12/10		15/10/12	18/11/13			15/12/16
		27/10/12	01/12/13			25/12/16
		18/11/12	26/12/13			
		28/11/12				
		15/12/12				
		27/12/12				

Tabela 8.2 - Datas dos perfis verticais realizados no local de amostragem RBA.

2010	**2011**	**2012**	**2013**	**2014**	**2015**	**2016**
08/01/10	08/02/11	22/01/12	24/01/13	09/01/14	26/01/15	07/01/16
16/02/10	15/02/11	09/02/12	29/01/13	29/01/14	25/02/15	08/02/16
13/03/10	05/03/11	29/02/12	25/02/13	01/03/14	31/03/15	27/02/16
30/03/10	31/03/11	22/03/12	06/03/13	08/04/14	04/04/15	17/03/16
24/04/10	18/04/11	12/04/12	22/03/13	30/04/14	24/04/15	22/04/16
13/05/10	07/06/11	21/04/12	22/04/13	21/05/14	04/11/15	30/04/16
30/05/10	27/06/11	29/04/12	17/05/13	30/05/14	17/11/15	16/05/16
19/06/10	17/07/11	19/05/12	31/05/13	24/06/14	04/12/15	31/05/16
27/06/10	28/07/11	30/05/12	24/06/13	01/07/14	11/12/15	09/06/16
15/07/10	24/08/11	13/06/12	03/07/13	12/07/14	21/12/15	29/06/16
29/07/10	31/08/11	28/06/12	25/07/13	11/08/14	30/12/15	14/07/16
10/08/10	25/09/11	13/07/12	21/08/13	16/08/14		02/08/16
28/08/10	04/10/11	22/07/12	27/08/13	30/10/14		31/08/16
10/09/10	31/10/11	06/08/12	27/09/13			21/09/16
24/09/10	14/11/11	31/08/12	08/10/13			28/09/16
16/10/10	08/12/11	12/09/12	17/10/13			15/10/16
21/11/10	22/12/11	09/10/12	07/12/13			02/11/16
06/12/10		29/10/12				20/11/16
26/12/10		17/11/12				08/12/16
		28/11/12				23/12/16
		17/12/12				
		28/12/12				

Tabela 8.3 - Datas dos perfis verticais realizados no local de amostragem SAN.

2010	2011	2012	2013	2014	2015
07/01/10	21/01/11	13/01/12	16/01/13	14/01/14	07/01/15
14/01/10	29/01/11	27/01/12	30/01/13	11/02/14	22/01/15
23/01/10	11/02/11	11/02/12	18/02/13	23/02/14	06/02/15
04/02/10	24/02/11	29/02/12	06/03/13	03/04/14	19/02/15
19/02/10	17/03/11	14/03/12	22/03/13	26/04/14	13/03/15
08/03/10	29/03/11	28/03/12	16/04/13	17/05/14	11/04/15
26/03/10	09/04/11	10/04/12	25/04/13	27/05/14	
09/04/10	26/04/11	23/04/12	07/05/13	15/07/14	
26/04/10	11/05/11	09/05/12	22/05/13	28/07/14	
14/05/10	24/05/11	24/05/12	05/06/13	30/08/14	
01/06/10	09/06/11	19/06/12	26/06/13	29/09/14	
17/06/10	12/07/11	29/06/12	10/07/13	10/10/14	
05/07/10	28/07/11	17/07/12	30/07/13	28/10/14	
21/07/10	22/08/11	31/07/12	12/08/13	05/11/14	
22/09/10	06/09/11	18/08/12	26/08/13	30/11/14	
22/10/10	20/09/11	29/08/12	16/09/13	23/12/14	
05/11/10	06/10/11	20/09/12	26/09/13		
06/12/10	24/10/11	27/09/12	15/10/13		
22/12/10	12/11/11	15/10/12	25/10/13		
	25/11/11	30/10/12	12/11/13		
	13/12/11	16/11/12	29/11/13		
	26/12/11	29/11/12	10/12/13		
		17/12/12	30/12/13		
		27/12/12			

Tabela 8.4 - Datas dos perfis verticais realizados no local de amostragem TAB/TEF.

2010	2011	2012	2013	2014	2015
09/01/10	23/01/11	17/02/12	27/02/13	16/01/14	13/01/15
17/02/10	27/02/11	29/03/12	31/03/13	23/01/14	28/01/15
17/03/10	16/03/11	30/04/12	26/05/13	18/02/14	26/02/15
27/03/10	30/03/11	29/05/12	12/06/13	05/03/14	21/03/15
27/04/10	20/04/11	22/06/12	05/07/13	18/03/14	
18/05/10	04/05/11	31/07/12	22/10/13	17/04/14	
20/06/10	24/06/11	23/09/12	28/10/13	20/05/14	
22/06/10	26/06/11	28/10/12	21/11/13	05/06/14	
17/07/10	23/07/11	30/11/12	08/12/13	04/08/14	
27/07/10	31/07/11			11/08/14	
18/08/10	25/08/11			12/09/14	
29/08/10	27/09/11			24/09/14	
18/09/10	02/10/11			09/10/14	
26/09/10	29/12/11			17/11/14	
23/10/10				05/12/14	
30/10/10				26/12/14	
23/11/10					
18/12/10					
29/12/10					

Tabela 8.5 - Datas dos perfis verticais realizados no local de amostragem SAH.

2013	2014
19/01/13	09/02/14
10/03/13	19/04/14
27/04/13	25/05/14
18/05/13	15/06/14
23/06/13	11/08/14
29/07/13	25/10/14
31/08/13	15/11/14
02/11/13	10/12/14
26/11/13	12/12/14
14/12/13	

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Diretoria de Pesquisa, Desenvolvimento e Ensino
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária CEP: 05508-000
Fone/Fax(0XX11) 3133-8908
SÃO PAULO – São Paulo – Brasil
http://www.ipen.br

O IPEN é uma Autarquia vinculada à Secretaria de Desenvolvimento, associada à Universidade de São Paulo e gerida técnica e administrativamente pela Comissão Nacional de Energia Nuclear, órgão do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações.