



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

**Estudo das propriedades de absorção de *Brown Carbon* e *Black Carbon*
utilizando sensoriamento remoto e medidas *in situ* na Amazônia**

FERNANDO GONÇALVES MORAIS

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

Orientador:

Prof. Dr. Eduardo Landolfo

São Paulo

2022

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

**Estudo das propriedades de absorção de Brown Carbon e Black Carbon
utilizando sensoriamento remoto e medidas in situ na Amazônia**

Versão Corrigida

Versão Original disponível no IPEN

FERNANDO GONÇALVES MORAIS

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

**Orientador:
Prof. Dr. Eduardo Landulfo**

**São Paulo
2022**

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

Como citar:

MORAIS, F. G. ***Estudo das propriedades de absorção de Brown Carbon e Black Carbon utilizando sensoriamento remoto e medidas in situ na Amazônia.*** 2022. 136 f. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN, São Paulo. Disponível em: <<http://repositorio.ipen.br/>> (data de consulta no formato: dd/mm/aaaa)

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

Morais, Fernando G.

Estudo das propriedades de absorção de Brown Carbon e Black Carbon utilizando sensoriamento remoto e medidas in situ na Amazônia / Fernando G. Moraes; orientador Eduardo Landulfo. -- São Paulo, 2022.

136 f.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear (Materiais) -- Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2022.

1. Aerossol. 2. Brown Carbon. 3. Black Carbon. 4. Dependência espectral de BrC. 5. Forçante radiativa de aerossóis. I. Landulfo, Eduardo, orient. II. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Autor: Fernando Gonçalves Moraes

Título: Estudo das propriedades de absorção de *Brown Carbon* e *Black Carbon* utilizando sensoriamento remoto e medidas in situ na Amazônia.

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Data 03/05/2020

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr.: Eduardo Landulfo

Instituição: IPEN Julgamento: Aprovado

Prof. Dr.: Paulo Artaxo Netto

Instituição: IFUSP Julgamento: Aprovado

Prof. Dr.: Ênio Bueno Pereira

Instituição: INPE Julgamento: Aprovado

Prof. Dr.: Rafael da Silva Palácios

Instituição: UFPA Julgamento: Aprovado

Dedico este trabalho às três mulheres da minha vida. À minha filha Sofia, que com seus olhinhos atentos, perguntas perspicazes e frequentes me conduziu a entender um pouco melhor o sentido da vida. À minha querida e amada esposa Simara, que como uma torre forte sempre suportou as dificuldades e desafios que enfrentamos juntos, me ensinando sempre a entregar o máximo e ajudando a desenvolver o melhor de mim. E à minha querida mãe Olinda, por ser a grande motivadora de tudo o que eu realizei na vida, pois ela sempre acreditou em mim, até mesmo quando eu ainda não sabia que seria possível.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por permitir que fosse possível a realização desta tese e à minha família e amigos por todo o suporte emocional que me proporcionaram.

Ao meu orientador Eduardo Landulfo, pela orientação, apoio e incentivo.

Ao Paulo Artaxo, pela parceria técnico-científica ao longo de muitos anos e pelo auxílio fundamental na concepção e execução desta tese.

Ao José Vanderlei Martins, pelo suporte com as medidas realizadas na UMBC e por todas as inúmeras criativas discussões que ajudaram em muito este trabalho.

Aos professores Henrique Barbosa, Alexandre Correia, Maria de Fátima Andrade, Luciana Rizzo, Márcia Yamasoe, Samara Carbone, Christopher Pöhlker, Rafael Palácios e José de Souza Nogueira (em memória), bem como a todos os membros da banca de defesa, pelos ensinamentos e discussões que me auxiliaram muito na formação do pensamento científico.

Aos doutores Marco A. Franco, Djacinto Santos, Fabio Jorge, Bruna Holanda, Janaína Nascimento, Milena Ponczek, Francisco Neto, Stefan Wolff, Fernanda Mendonça e Adriana Rocha Lima, pela enorme ajuda com dicas preciosas de análises de dados e experimentos em campo.

A todos os membros e alunos do LEAL (Laser Environmental Applications Laboratory) no IPEN e do LFA (Laboratório de Física Atmosférica) do IFUSP.

Aos pesquisadores em campo Delano Campos, Bruno Takeshi, Edilson Andrade, Alberto W. Dresch, João Basso, Paulo Arruda e Alejandro Fonseca Duarte, pela operação da rede NASA/AERONET ao longo de tantos anos.

À equipe de membros e funcionários do ATTO (Amazon Tall Tower Observatory), pela assistência na execução do trabalho.

Ao LCT (Laboratório de Caracterização Tecnológica) e à pesquisadora Liz Zanchetta, pelo apoio nas análises de microscopia eletrônica.

À NASA/AERONET e aos pesquisadores Brent Holben e Joel Schafer, pela sempre pronta ajuda na manutenção e análise de dados dos fotômetros.

“Para ser grande, sê inteiro: nada
Teu exagera ou exclui.
Sê todo em cada coisa. Põe quanto és
No mínimo que fazes.
Assim em cada lago a lua toda
Brilha, porque alta vive”.

Ricardo Reis, 14-2-1933
(heterônimo de Fernando Pessoa)

RESUMO

Morais, Fernando Gonçalves. **Estudo das propriedades de absorção de *Brown Carbon* e *Black Carbon* utilizando sensoriamento remoto e medidas *in situ* na Amazônia.** Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares- IPEN-CNEN/SP. São Paulo.

O efeito dos aerossóis no balanço de radiação é uma das maiores fontes de incertezas na estimativa da forçante radiativa antropogênica e, portanto, das mudanças climáticas globais. Em particular, a caracterização dos processos de absorção se torna fundamental para o entendimento do papel dos aerossóis sobre o clima. Uma das questões em aberto nesta área é a separação da absorção total entre as duas principais componentes, o *Black Carbon* (BC) e o *Brown Carbon* (BrC), principalmente em locais onde a influência antrópica é pequena, como na Amazônia Central. Os mecanismos que controlam a formação e evolução de BC e BrC em florestas tropicais ainda não são claros. Neste estudo, realizamos medições na torre ATTO (*Amazon Tall Tower Observatory*), em aerossóis coletados em filtros e os analisamos com espectrômetros óticos de alta resolução, com ampla faixa espectral (300 a 2500 nm). Determinamos as características de absorção do BrC e do BC em função do comprimento de onda. Os resultados mostram que a absorção de BrC é significativa abaixo de 660 nm e é máxima em comprimentos de onda próximos a 350 nm. Combinando a dependência espectral medida com a modelagem mie da contribuição do BC, determinamos que o BrC corresponde em média a 15% da absorção total no sítio do ATTO na Amazônia. Como método alternativo, medimos a fração de BrC à absorção total através da análise de dados por sensoriamento remoto com fotômetros da rede NASA/AERONET e observamos uma alta fração (25%) de BrC na absorção ao longo da coluna atmosférica. Os diferentes métodos para quantificar BC e BrC são consistentes e apresentam resultados semelhantes. Este estudo permitiu ainda quantificar a forçante radiativa direta dos aerossóis na Amazônia em -4.28 W/m^2 , considerando apenas a absorção de BrC $+0.43 \text{ W/m}^2$. A síntese destas análises permitiu quantificar a absorção de aerossóis da floresta Amazônia e o seu papel nas mudanças climáticas.

Palavras-chave: Aerossol; *Brown Carbon*; *Black Carbon*; Propriedades óticas; Dependência espectral de BrC; Forçante radiativa de aerossóis.

ABSTRACT

Morais, Fernando Gonçalves. **Absorption properties of Brown Carbon and Black Carbon study using remote sensing and *in situ* measurements in the Amazonia**. Thesis (Doctorate in Nuclear Technology) – Institute for Energy and Nuclear Research – IPEN-CNEN/SP. Sao Paulo.

The effect of aerosols on the radiation balance is one of the biggest sources of uncertainty in the estimation of anthropogenic radiative forcing, and therefore of global climate change. It is necessary to better characterize the effect of radiation absorption by aerosols, due to their remarkable radiative effects on the climate. One of the open questions in this area is the separation of the total absorption between the two main components, Black Carbon (BC) and Brown Carbon (BrC), mainly in places where the anthropic influence is small, as in the Central Amazon. The mechanisms that control the formation and evolution of BC and BrC in tropical forests are still unclear. In this study, we performed measurements at the ATTO tower (Amazon Tall Tower Observatory), on aerosols collected in filters and analyzed them with high-resolution optical spectrometers with a wide spectral range (300 to 2500 nm). We determined the absorption characteristics of BrC and BC as a function of wavelength. The results show that BrC absorption is significant below 660 nm and is maximum at wavelengths close to 350 nm. Combining the measured spectral dependence with mie modeling of BC contribution, we determined that BrC corresponds on average to 15% of the total absorption at the ATTO site in Amazonia. As an alternative method, we measured the fraction of BrC at total absorption by analyzing data by remote sensing with photometers from the NASA/AERONET network and observed a high fraction (25%) of BrC in absorption along the atmospheric column. The different methods to quantify BC and BrC are consistent and present similar results. This study also allowed to quantify the direct radiative forcing of aerosols in the Amazon at -4.28 W/m^2 , considering only the absorption of BrC $+0.43 \text{ W/m}^2$. The synthesis of these analyzes made it possible to quantify the absorption of aerosols from the Amazon rainforest and its role in climate change.

Keywords: Aerosol; Brown Carbon; Black Carbon; Optical properties; Spectral dependence of BrC; Radiative forcing of aerosols.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - A ilustração mostrando o complexo comportamento do BC na atmosfera, com emissões industriais, de queimadas e outras fontes. 16
- Figura 2 - Forçante radiativa do sistema climático terrestre calculado pelo IPCC em seu relatório AR5, publicado em 2013. 17
- Figura 3 - Efeitos climáticos do BC expressos pela forçante radiativa no topo da atmosfera com seus vários impactos climáticos. Temos os efeitos direto e indireto do BC, além da alteração do albedo causado pela deposição de BC em áreas com neve e gelo. 18
- Figura 4 - Ilustração da atribuição de absorção utilizando o expoente de absorção de Ångström (AAE). O Brown Carbon domina a absorção para comprimentos de onda próximo do UV. A absorção pelo BC varia pouco com o comprimento de onda. 20
- Figura 5 - O expoente de absorção de Ångström (AAE) para BC estimado utilizando cálculos da teoria Mie para diferentes coatings (revestimentos). Observamos que o AAE do BC pode ser diferente de 1 dependendo do tamanho da partícula. Isso afeta sobremaneira a absorção. 21
- Figura 6 - Intensidade de radiação espalhada em função do ângulo de espalhamento Θ para medidas em campo das propriedades óticas dos aerossóis na cidade de São Paulo. Os dados foram obtidos em 30 de julho de 2019, às 9:40 LT, utilizando um conjunto composto por um polarizador e um smartphone, apresentado no SPSAS (*Sao Paulo School of Advanced Science on Atmospheric Aerosols*): propriedades, medições, modelagem e efeitos sobre o clima e saúde, realizado na Universidade de São Paulo (USP). 29
- Figura 7- Localização dos fotômetros solares da rede AERONET na Amazônia. O sítio do ATTO, além do fotômetro da rede AERONET, contém também um parque de equipamentos para medidas em solo. 36
- Figura 8 - Fotômetro solar instalado no topo de uma torre de 80m na Amazônia (ATTO). Medidas da espessura ótica de aerossóis e propriedades físicas em vários comprimentos de onda são feitas continuamente. 37
- Figura 9 - Princípio esquemático de funcionamento do instrumento MAAP para a medida em tempo real de BC. Simultaneamente à medida de absorção em um filtro de fibra de vidro, o espalhamento ótico é determinado e descontado através de algoritmo desenvolvido para o instrumento. 39
- Figura 10 - Aetalômetro modelo AE 33, que mede absorção em 7 comprimentos de onda, e princípio de funcionamento do Aetalômetro modelo AE33, com dois feixes de referência de medidas para cálculos de correções de loading de BC. 40

Figura 11 - Componentes internos de um nefelômetro Aurora 3000, onde 1) é a câmara de medição, 2) fonte de luz, 3) conexão de entrada para o ar amostrado, 4) conexão de filtro para procedimentos zero e 5) conexão de gás de calibração. ..42

Figura 12 - Esquema de funcionamento do sistema SMPS da TSI. Na lateral esquerda da figura é possível ver a entrada de um fluxo polidisperso de partículas de aerossol. Após passar pelo impactador, o neutralizador induz uma distribuição de cargas conhecida, permitindo a separação de um fluxo monodisperso de partículas pelo DMA. Ao final, as partículas de aerossol do fluxo monodisperso são contadas no CPC..... 43

Figura 13 - Vista frontal do SP2 (Single Particle Soot Photometer), instrumento utilizado para obtenção da distribuição de tamanho do BC no sítio do ATTO na Amazônia..... 44

Figura 14 -Esquema de funcionamento do ACSM. As partículas do aerossol são focalizadas pelas lentes aerodinâmicas, impactadas pelo vaporizador, ionizadas por impactação de elétrons e caracterizadas quimicamente no espectrômetro de massas quadrupolo RGA. A câmera de detecção contém também uma fonte efusiva de naftaleno, utilizada para calibração e monitoramento da performance do instrumento..... 45

Figura 15 - a) Representação gráfica da amostragem dos filtros no sítio do ATTO, b) diagrama detalhado da amostragem dos filtros Nuclepore. 47

Figura 16 - Configuração experimental usada para medições de refletância ótica: Os componentes do espectrômetro Avantes são apresentados como: (1) espectrômetro, (2) lâmpada, (3) fibra ótica bifurcada, (4) fibra ótica apontando o filtro, (5) superfície porosa e posição do filtro, (6) mesa ajustável e (7) fonte de alimentação e ventilador. Os componentes do espectrômetro ASD são: (8) cabeça do refletômetro e (9) superfície de PTFE para colocar o filtro. A eletrônica do espectrômetro ASD não é mostrada nesta imagem. 48

Figura 17 Refletômetro M43D Smokestain da Diffusion Systems do Laboratório de Física atmosférica do Instituto de Física da USP. Consiste basicamente em uma fonte de luz, que é um LED de alto desempenho com emissão máxima a 650 nm, e uma célula fotovoltaica que mede refletância emitida pelo filtro. 49

Figura 18 – Arranjo experimental para obtenção de filtros padrão de BC. 51

Figura 19 - Relação entre a densidade de massa das amostras padrão de BC versus a razão do logaritmo natural de refletância $\ln(\rho/\rho_0)$ normalizado por filtros limpos e não amostrados para os 23 filtros Nuclepore amostrados por Martins et al 2009, além de 7 filtros Nuclepore e 3 filtros de Teflon amostrados pelo autor da tese com diferentes massas. 52

Figura 20 – Espectrômetro de fluorescência de raios X Epsilon 5 PANalytical B.V do laboratório de física atmosférica do Instituto de Física da USP..... 54

Figura 21 – MEV de filtro Nuclepore amostrado com padrão de BC do tipo Monarch 71, onde pode-se observar o formato e o tamanho médio das partículas de BC.	55
Figura 22 - Série temporal de 1999 a 2022 das medidas de profundidade ótica de aerossol (AOD) para o comprimento de onda de 500nm nos sítios de pesquisa onde estamos caracterizando o BrC	63
Figura 23 - Série temporal da fração de BrC e BC do AAOD em 440nm, a partir de dados de fotômetro da rede AERONET no sítio da torre ATTO.	64
Figura 24 - Distribuição espacial das medidas de BC e BrC, onde observamos em amarelo a porcentagem de BC e em azul a porcentagem de BrC para o AAOD em 440nm.....	65
Figura 25 - Matrizes de Ångström a partir de dados de fotômetro da rede AERONET no arco do desmatamento, mostrando comportamento similar quanto à natureza do aerossol entre sítios mais de 1000 km distantes entre si e em operação por mais de 20 anos.	66
Figura 26 - Matrizes de Ångström a partir de dados de fotômetro da rede AERONET no sítio do ATTO e Manaus EMBRAPA, mostrando o domínio de BC durante os meses de julho a novembro e influência de Dust nos meses de janeiro a abril. ...	67
Figura 27- Um resumo de todas as medidas realizadas em paralelo durante a amostragem dos filtros Nuclepore no sítio do ATTO em 2019, a saber, medidas de composição química, distribuições de tamanho, refletância e absorção, com o intuito de atribuir a fração correspondente de BrC e BC.	68
Figura 28 – Análises de MEV e EDS para o filtro de Nuclepore 26 coletados na Amazônia na estação seca entre 11/09/2021 às 18:06 e 20/09/2019 às 15:22....	69
Figura 29 – Espectro obtido a partir da repetição de 3 medidas EDS para o filtro Nuclepore 26 coletados na Amazônia na estação seca entre 11/09/2021 às 18:06 e 20/09/2019 às 15:22. A Platina (Pt) presente foi adicionada para preparo da amostra na técnica de MEV.	70
Figura 30 – Massa correspondente de cada elemento químico presente nas 34 amostras obtidas com FRX e cálculo de massa correspondente de Dust em vermelho.....	71
Figura 31 - Comparação entre o BC obtido por diferentes instrumentos, para o período de amostragem dos 34 filtros coletados na Amazônia em 2019.	72
Figura 32 - Comparação entre o BC obtido por SP2 (Single Particle Soot Photometer) e medida indireta de BC pelo refletômetro M43D Smoke Stain, para os 34 filtros coletados na Amazônia em 2019.	73

Figura 33 – Medida de refletância para os 34 filtros amostrados no sítio ATTO na Amazônia, obtido por espectrômetro ótico de alta resolução de 300 – 2500 nm, já descontado o efeito do fundo branco do filtro limpo e não amostrado.....	74
Figura 34 – Medidas de refletância já convertida em eficiência de absorção para o filtro 26, obtidas pelos espectrômetros AVA e ASD.	75
Figura 35 - Comparação entre os espectrômetros ASD e AVA para os 34 filtros mostrados.....	75
Figura 36 - Eficiência de absorção total e a fração de BC calculada a partir de dados de refletância obtidas pelos refletômetros ASD e AVA integrados para o filtro 26. A Fração de BC foi calculada a partir do algoritmos de WANG, XUAN et al. (2016).	76
Figura 37 - A dependência espectral da eficiência de absorção do BrC para o filtro 26.	77
Figura 38 - Dependência espectral do BrC para os 34 filtros coletados no ATTO na Amazônia.....	77
Figura 39 - Série temporal do BC e BrC no sítio ATTO na Amazônia em 2019, com dados de Aetalômetro AE33 e separação de BC e BrC pelo método desenvolvido por Wang, Xuan (2016).....	78
Figura 40 – Sazonalidade do BrC em relação à absorção total para o sítio do ATTO na Amazônia em 2019 para os 34 filtros amostrados. Em azul estação chuvosa, roxo estação de transição e amarelo a estação seca.	79
Figura 41 - Análise entre BrC derivado do AE33 e a massa de aerossóis orgânicos.	81
Figura 42 – a) Distribuição de tamanho para a estação chuvosa no ATTO em 2019, mostrando a moda de nucleação com diâmetro médio em 34 nm, a moda de Aitken em 59 nm e a moda de acumulação em 138 nm. b) Distribuição de tamanho para a estação seca no mesmo local mostrando a moda de Aitken em 59 nm e a moda de acumulação em 128 nm. A linha contínua representa a média, e a linha tracejada a mediana dos dados nos respectivos períodos.	82
Figura 43 – Matriz de Angstrom para os dados coletados in situ no ATTO em 2019, utilizando Nefelômetro e Aetalômetro. Os pontos maiores numerados de 1 a 34 representam os períodos de amostragem dos filtros de Nuclepore e as cores estão correlacionadas com os meses do ano.....	83
Figura 44 - Análise de Cluster das variáveis por Wards error sum, com dados normalizados.	85
Figura 45 – Irradiância difusa ascendente no topo da atmosfera, considerando absorção e espalhamento e levando em conta apenas a fração absorvedora como	

a absorção total (BrC+BC), absorção relativa à fração de BC e absorção relativa à fração de BrC.....	88
Figura 46 – Forçante radiativa dos aerossóis (DRF) considerando absorção e espalhamento em azul. Além disso, em cinza, levando em conta apenas a fração absorvedora como a absorção total (BrC+BC), absorção relativa à fração de BC e absorção relativa à fração de BrC. As linhas em vermelho se referem aos valores médios obtidos para os 34 filtros.....	89
Figura 47 – Irradiância difusa ascendente no topo da atmosfera, em função das estações chuvosa, de transição e seca.	90
Figura 48 - Medianas mensais em boxplot do AOD em 500nm para o sítio do ATTO de 2016 a 2022.....	91
Figura 49 – Variação sazonal da média diária das forçantes radiativas diretas dos aerossóis, considerando absorção e espalhamento e apenas a fração absorvedora.	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados de massa em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para a componente química, medida pelo ACSM em 2019 no sítio do ATTO na Amazônia, para os 34 filtros amostrados no período. 80

Tabela 2 - Resultados da Análise de Fatores Principais na base de dados da torre ATTO, com a matriz de fatores, rodada por rotação ortogonal VARIMAX..... 87

LISTA DE ABREVIATURAS E/OU SIGLAS

AAE	Expoente de absorção de Ångström
AAOD	Profundidade ótica de absorção do aerossol
ACSM	Monitor de especiação química de aerossol
AOD	Profundidade ótica de aerossol
AOT	Espessura ótica de aerossol
ASD	Espectrômetro FieldSpec Pro da Analytical Spectral Devices
ATTO	Observatório da Torre Alta da Amazônia
AVA	Espectrômetro Avantes AvaSpec 2048
BC	Black Carbon
BCe	Black Carbon equivalente
BrC	Brown Carbon
CPC	Contador de partículas por condensação
DMA	Analisador de mobilidade diferencial
DRE	Efeito Radiativo Direto
DRF	Forçante Radiativa Direta
Dust	Partículas de poeira mineral
EDS	Espectroscopia de raios X por dispersão em energia
EDXRF	Fluorescência de raios X por energia dispersiva
HULIS	Substâncias semelhantes a húmicos
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima
LCT	Laboratório de Caracterização Tecnológica
MAAP	Fotômetro de absorção multi-ângulo
MAC	Coeficiente de absorção de massa
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
OC	Carbono orgânico
PAHs	Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos
PCA	Análise de componente principal
SAE	Expoente de espalhamento de Ångström
SMPS	Varredura de tamanho de partícula por mobilidade
SOA	Aerossóis orgânicos secundários
SSA	Albedo de espalhamento simples
SZA	Ângulo Zenital Solar

TOA	Topo da atmosfera
UV	Ultravioleta
WDA	Dependência espectral do expoente Ångström de absorção
WSOC	Carbono orgânico solúvel em água

LISTA DE SÍMBOLOS

D_p	Diâmetro da partícula (nm)
I_0	Intensidade de radiação incidente (W/m^2)
I_{abs}	Intensidade de radiação absorvida (W/m^2)
I_{scat}	Intensidade de radiação espalhada (W/m^2)
m	Massa (g)
N_{ref}	Índice de refração do material
$P(\Theta)$	Função de fase
Q_{abs}	Eficiência de absorção
Q_{ext}	Eficiência de extinção
Q_{scat}	Eficiência de espalhamento
S_{abs}	Seção de choque de absorção (m^2)
S_g	Área geométrica da seção de choque (m^2)
S_{scat}	Seção de choque de espalhamento (m^2)
α_{abs}	Coefficiente de absorção de massa (m^2/g)
α_{scat}	Coefficiente de espalhamento de massa (m^2/g)
K	Parâmetro de tamanho
λ	Comprimento de onda (nm)
σ_{abs}	Coefficiente de absorção ($1/m$)
σ_{ext}	Coefficiente de extinção ($1/m$)
σ_{scat}	Coefficiente de espalhamento ($1/m$)
ω_0	Albedo de espalhamento simples
\AA	Expoente de Ångström

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO E CONCEITUALIZAÇÃO	15
1.1	Organização deste trabalho	23
2	OBJETIVOS	24
2.1	Objetivo geral	24
2.2	Objetivos específicos	24
3	ABSORÇÃO DE RADIAÇÃO POR AEROSSÓIS NA AMAZÔNIA	25
3.1	Propriedades óticas dos aerossóis	25
3.1.1	Interação dos aerossóis com a radiação eletromagnética	25
3.1.2	Coeficientes de espalhamento e absorção	26
3.1.3	Profundidade ótica de aerossol	27
3.1.4	Coeficientes de espalhamento e absorção de massa	28
3.1.5	Função de fase	28
3.1.6	Índice de refração	30
3.1.7	Expoente de Ångström	30
3.2	Black Carbon	31
3.2.1	Propriedades do <i>Black Carbon</i>	32
3.3	Brown Carbon	33
3.3.1	Propriedades do <i>Brown Carbon</i>	33
3.4	A Bacia Amazônica	34
4	METODOLOGIA	35
4.1	Medidas por sensoriamento remoto através da rede AERONET	35
4.2	Medidas <i>in situ</i>	38
4.2.1	Medidas de <i>Black Carbon</i> equivalente em tempo real com o MAAP	38
4.2.2	A medida espectral da absorção com o Aetalômetro	39
4.2.3	A medida espectral do espalhamento com o Nefelômetro	41
4.2.4	Distribuição de tamanho do aerossol	42
4.2.5	Distribuição de tamanho de partículas de BC com SP2	44
4.2.6	Composição química do aerossol com ACSM	45
4.2.7	Coleta de filtros Nuclepore	46
4.3	Análises de absorção em filtros por refletômetros óticos	47
4.3.1	Amostragem e elaboração de filtros com BC padrão	50
4.4	Análises de filtros por fluorescência de raios X	53
4.5	Microscopia eletrônica de varredura e análises EDS	54

4.6	Estimativa do <i>Brown Carbon</i>	56
4.7	Obtenção das matrizes de Ångström	58
4.8	Estimativa da forçante radiativa direta de aerossóis carbonáceos ..	58
4.9	Análise multivariada de clusters	59
4.10	Análise multivariada de fatores principais	61
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	63
5.1	Resultados relativos ao sensoriamento remoto de aerossóis	63
5.2	Resultados relativos às medidas de absorção <i>in situ</i>	68
5.2.1	Análises de partículas individuais com MEV e espectros EDS	69
5.2.2	Análise química dos aerossóis por FRX	70
5.2.3	Determinação da absorção dos aerossóis por vários métodos.....	72
5.2.4	Absorção espectral por refletômetros de alta resolução	73
5.2.5	Correlações das propriedades medidas com a massa de orgânicos	79
5.2.6	Diâmetro médio do aerossol.....	81
5.2.7	Matriz de Ångström com medidas <i>in situ</i> no ATTO.....	83
5.3	Resultados das análises de Cluster e Fatores para as medidas <i>in situ</i>	84
5.4	Resultados da estimativa da forçante radiativa direta dos aerossóis na Amazônia	87
6	CONCLUSÕES	94
6.1	Perspectivas Futuras.....	98
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99
	APÊNDICE A – Artigos publicados durante o doutorado	117
A1	Filtration efficiency of a large set of COVID-19 face masks commonly used in Brazil	117
A2	Tropical and boreal forest--atmosphere interactions: A review	117
A3	Occurrence and growth of sub-50 nm aerosol particles in the Amazonian boundary layer	117
A4	Linking chemical composition and optical properties of biomass burning aerosols in Amazonia.....	118
A5	Decontamination and reuse of surgical masks and respirators during the COVID-19 pandemic	118
A6	Aerosol properties in the atmosphere of Natal/Brazil measured by an AERONET Sun-photometer.....	118
A7	Long-term measurements of aerosol optical properties and radiative forcing (2011-2017) over Central Amazonia.....	118
A8	Exploring the Twilight Zone: a multi-sensor approach	119

A9	Influx of African biomass burning aerosol during the Amazonian dry season through layered transatlantic transport of Black Carbon-rich smoke.....	119
A10	Long Term Analysis of Optical and Radiative Properties of Aerosols in the Amazon Basin	119
A11	Ground-based observation of clusters and nucleation mode particles in the Amazon	119
A12	Recent progress of filtration mechanism to fabricate the effective COVID-masks: A review	120
A13	Influence of microstructure and physical characteristics in the performance of non-professional masks sold in São Paulo	120
A14	Optical properties and spectral dependence of aerosol light absorption over the Brazilian Pantanal.....	120
	APÊNDICE B - Apresentações em congresso	121

1 INTRODUÇÃO E CONCEITUALIZAÇÃO

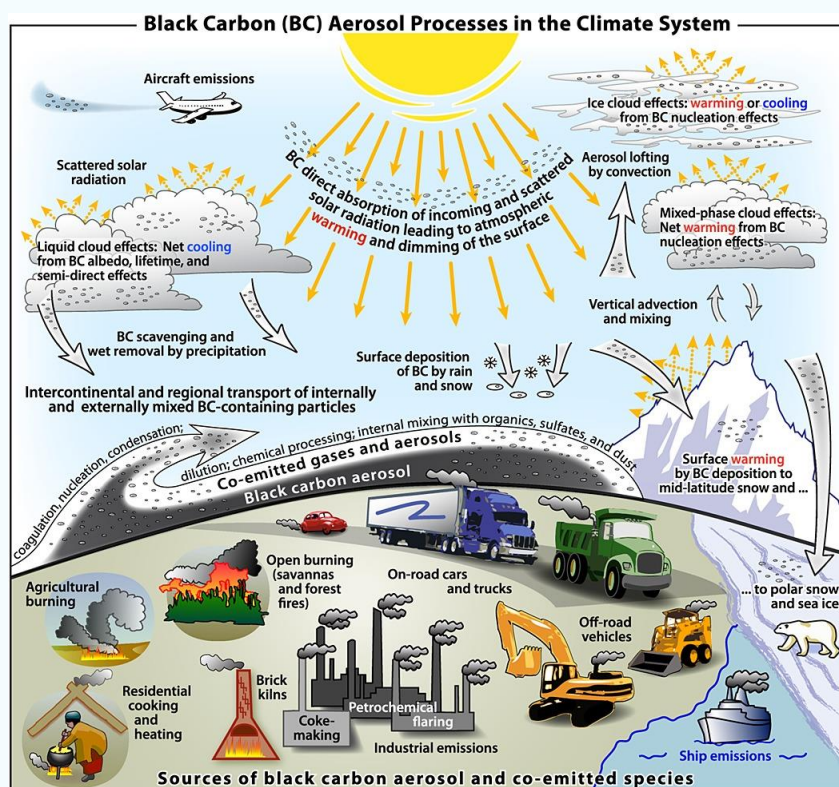
O impacto radiativo de aerossóis é certamente uma das maiores fontes de incertezas na estimativa da forçante radiativa antropogênica e, portanto, das mudanças climáticas globais, de acordo com os relatórios do IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas) (IPCC, 2014). A absorção de radiação por aerossóis é uma das questões principais em aberto neste aspecto (FENG et al., 2013). As partículas de aerossóis suspensas na atmosfera vêm de muitas fontes, algumas naturais e outras antrópicas. Alguns aerossóis são de origem orgânica (contendo compostos orgânicos), enquanto outros são inorgânicos (sulfatos, nitratos, sal marinho, poeira etc.). As propriedades óticas dos aerossóis podem ser descritas matematicamente com uma componente real e uma imaginária, onde a parte real se refere aos aerossóis que espalham radiação e a componente imaginária se refere aos aerossóis que absorvem radiação, incluindo os comprimentos de onda da faixa do visível.

Entre os aerossóis carbonáceos, duas componentes se destacam: o chamado "*Black Carbon*" (BC) que consiste em partículas emitidas em processos de combustão em alta temperatura (BOND, TAMI C.; BERGSTROM, 2006) e o chamado "*Brown Carbon*" (BrC), que consiste em partículas de carbono orgânico (OC), com propriedades de absorção de radiação na região do ultravioleta e visível (ANDREAE; GELENCSEÉR, 2006). A Amazônia possui excelentes condições de estudo e quantificação de aerossóis, levando em conta a sua sazonalidade (ARTAXO et al., 2013), pois é possível caracterizar a absorção de aerossóis tanto por BC quanto por BrC em locais com interferência antrópica e em regiões onde predominam condições naturais próximos ao pristino, permitindo estudar mecanismos que controlam a formação e evolução de BC e BrC na floresta.

O BC é emitido diretamente na atmosfera e tem uma combinação única de propriedades físicas, as quais absorvem fortemente radiação solar na região do visível (BOND, T. C. et al., 2013). As maiores fontes globais de BC são queimadas de florestas e savanas, queima de combustíveis sólidos, diesel e processos industriais de combustão em geral. Uma vez emitido, o BC é transportado em escala regional e continental, sendo removido da atmosfera por deposição seca e úmida, resultando em um tempo de vida médio de aproximadamente uma semana.

A Figura 1 ilustra os complexos processos atmosféricos envolvendo a emissão, deposição e processamento atmosférico do BC.

Figura 1 - A ilustração mostrando o complexo comportamento do BC na atmosfera, com emissões industriais, de queimadas e outras fontes.



Fonte: (BOND, T. C. et al., 2013)

A componente de BrC absorve majoritariamente na faixa de radiação ultravioleta e nos menores comprimentos de onda da faixa do visível, sendo que parte do BrC pode consistir de aerossóis orgânicos secundários (SOA) formados na atmosfera (HOFFER et al., 2006).

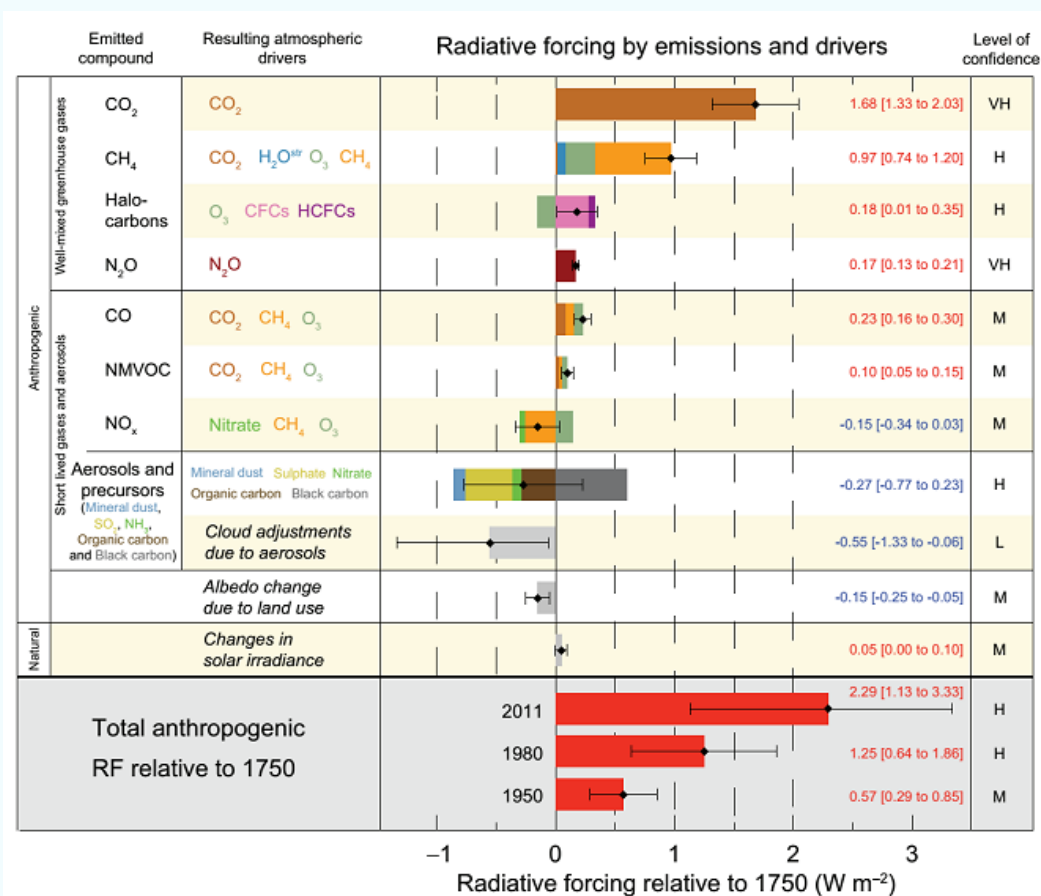
Recentemente, o BrC tem atraído de maneira significativa o interesse da comunidade científica como um coadjuvante na questão das mudanças climáticas, pois estudos mostram que alguns aerossóis carbonáceos podem também absorver radiação, principalmente em comprimentos de onda no UV (CHAKRABARTY, R. K. et al., 2010; KIRCHSTETTER et al., 2004; CHEN; BOND, 2010; HECOBAN et al., 2010; AROLA et al., 2011). Esta classe de partículas é conhecida pela sua cor amarronzada clara (CHAKRABARTY, RAJAN K. et al., 2014). Estes trabalhos apontam para uma alta diversidade entre os tipos de BrC, entre eles, alcatrão produzido por combustão lenta e de baixa temperatura, produtos de degradação a partir da queima de biomassa, misturas de compostos orgânicos emitidos a partir

do solo, e alguns compostos orgânicos voláteis emitidos pela vegetação e oxidados na atmosfera.

Experimentos de laboratório em câmaras de aerossóis e experimentos de campo têm fornecido evidências claras da existência desta componente de carbono orgânico absorvedor de luz (LEE et al., 2014; ZHAO et al., 2015). No entanto, na maioria dos modelos climáticos globais, as partículas orgânicas ainda são consideradas apenas como aerossóis espalhadores, refletindo a radiação solar (KANAKIDOU et al., 2004).

Os aerossóis carbonáceos apresentam um importante papel para a forçante radiativa global, como mostra a Figura 2 (IPCC, 2014) mostrando que o BC é responsável por uma forte forçante radiativa de $+0.65 \text{ W/m}^2$. Portanto, o papel do BC e do BrC é de aquecer a atmosfera.

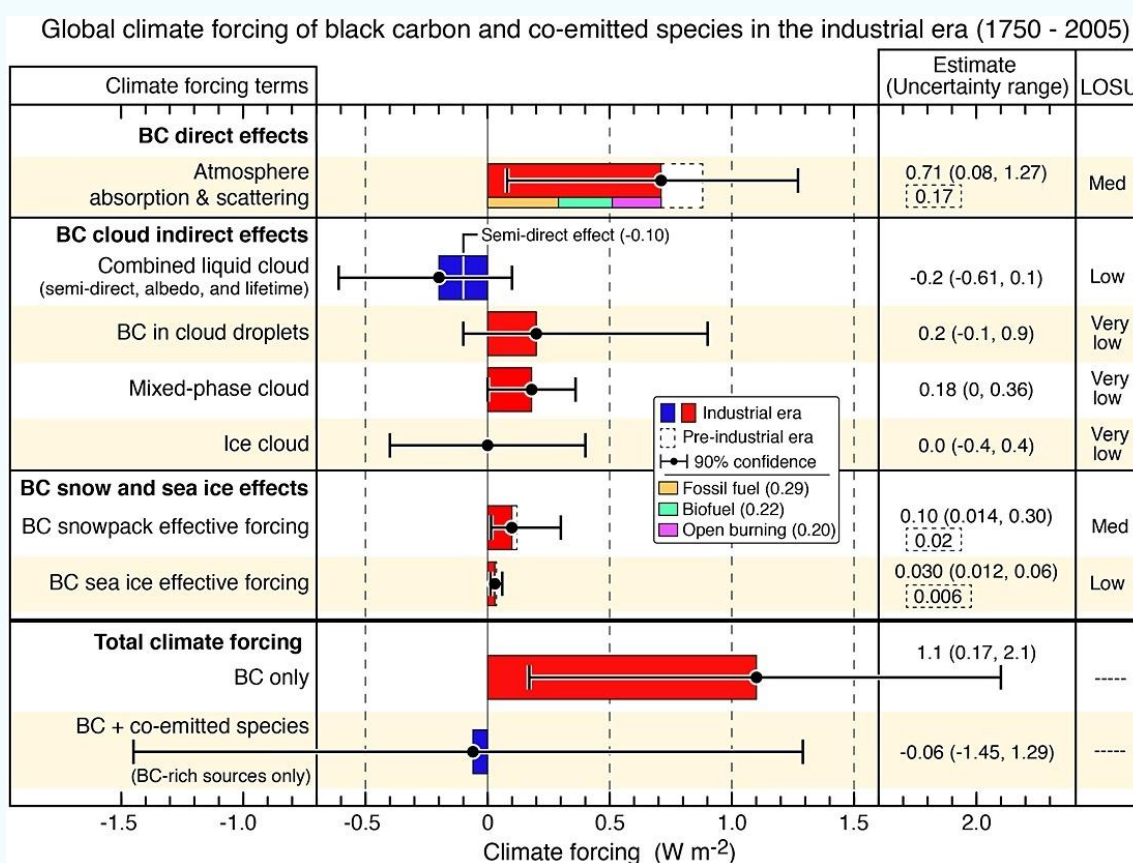
Figura 2 - Forçante radiativa do sistema climático terrestre calculado pelo IPCC em seu relatório AR5.



Fonte: (IPCC, 2014)

Entretanto, BOND, T. C. et al. (2013) estima esta mesma forçante radiativa global do BC em $+1,1 \text{ W/m}^2$, valor extremamente elevado, considerando que a forçante do CO_2 é de $+1.68 \text{ W/m}^2$, como mostra a Figura 3. Observamos o grande desvio padrão da forçante radiativa de BC, bem como o fato de que, se incluirmos as espécies co-emitidas, a forçante pode se tornar zero, mas com uma variabilidade de -1.45 a $+1.29 \text{ W/m}^2$.

Figura 3 - Efeitos climáticos do BC expressos pela forçante radiativa no topo da atmosfera com seus vários impactos climáticos. Temos os efeitos direto e indireto do BC, além da alteração do albedo causado pela deposição de BC em áreas com neve e gelo.



Fonte: (BOND, T. C. et al., 2013)

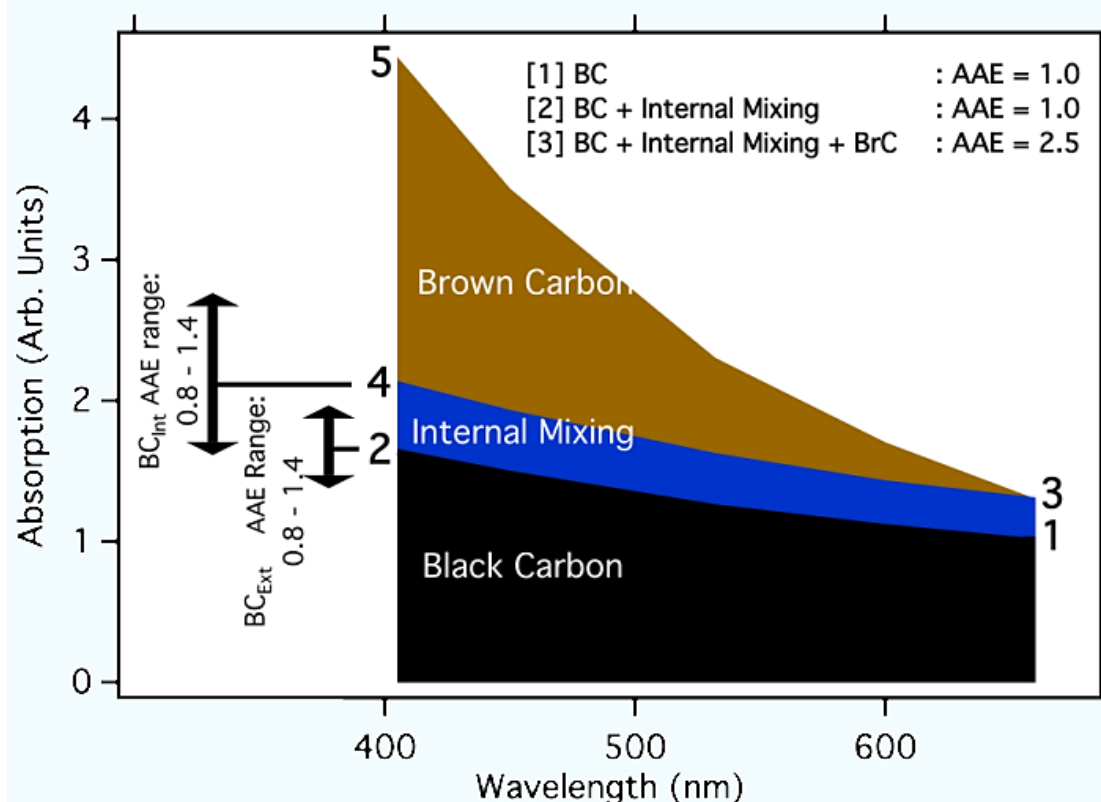
O impacto radiativo total do aerossol depende do espalhamento e absorção da radiação, incluindo a absorção pelo aerossol orgânico que pode ser parte do BrC. As estimativas quantitativas do caráter absorvedor do BrC variam de acordo com o método utilizado para obtê-lo e a fonte originária deste tipo de aerossol orgânico. Há muitas incertezas nesta determinação de BrC. Modelos globais têm sido aplicados para estimar a forçante radiativa direta (DRF) e os efeitos radiativos diretos (DREs) do BrC, onde DRE representa a diferença do balanço radiativo com e sem aerossóis, e DRF representa a diferença de DRE entre os dias atuais e os

tempos pré-industriais (HEALD et al., 2014). O estudo de FENG et al. (2013) sugeriu um efeito de aquecimento do BrC que varia entre +0.04 a +0.11 W/m² no topo da atmosfera devido à absorção. Por sua vez, WANG, XUAN. et al. (2014) estimou a partir de dados de profundidade ótica de absorção do aerossol (AAOD), que o DRF de BC é +0.21 W/m², com um adicional de +0.11 W/m² de aquecimento do BrC. JO et al. (2016) estimou a DRE de BrC como +0.11 W/m². BROWN et al. (2018) estimou a DRE do BrC em + 0.13 ± 0.01 W/m² e 0.01 ± 0.04 W/m² da interação BrC aerossol-nuvem. SALEH et al. (2015) estimou a DRE do BrC de 0.22 W/m² quando BrC é misturado externamente com BC e 0.12 W/m² quando BrC é misturado internamente com BC. ZHANG, A. et al. (2019) mostrou que globalmente BrC é um absorvedor significativo, com DRE de +0.10 W/m², que representa mais de 25% do DRE de BC (+0.39 W/m²). Estes estudos nos mostram que as propriedades óticas do BrC ainda precisam ser melhor entendidas, antes que possam ser consideradas em simulações climáticas globais e regionais.

Para a obtenção da contribuição de BrC, utiliza-se em geral o método proposto por LACK; LANGRIDGE (2013). Este método utiliza um par de medidas, normalmente abrangendo os extremos do espectro da luz visível (~400nm a ~800nm). A absorção no comprimento de onda maior é assumida como sendo majoritariamente proporcional ao BC. Esta medida de absorção é extrapolada para o comprimento de onda menor, utilizando o expoente de absorção de Ångström (AAE), e a diferença entre este valor atribuído ao BC e a absorção total no comprimento de onda menor é então atribuída a absorção para uma componente que não é BC, a qual é denominada "*Brown Carbon*" (BrC). A Figura 4 apresenta uma ilustração deste método.

Observamos que a contribuição de BrC cresce com a diminuição do comprimento de onda, podendo até ser majoritário na absorção para comprimentos de onda menores que 450 nm. A contribuição de BC por seu lado é razoavelmente constante em função do comprimento de onda. As propriedades de absorção do BrC são ainda pouco conhecidas e por isso é necessário um estudo mais aprofundado das suas propriedades, em particular da dependência espectral da absorção.

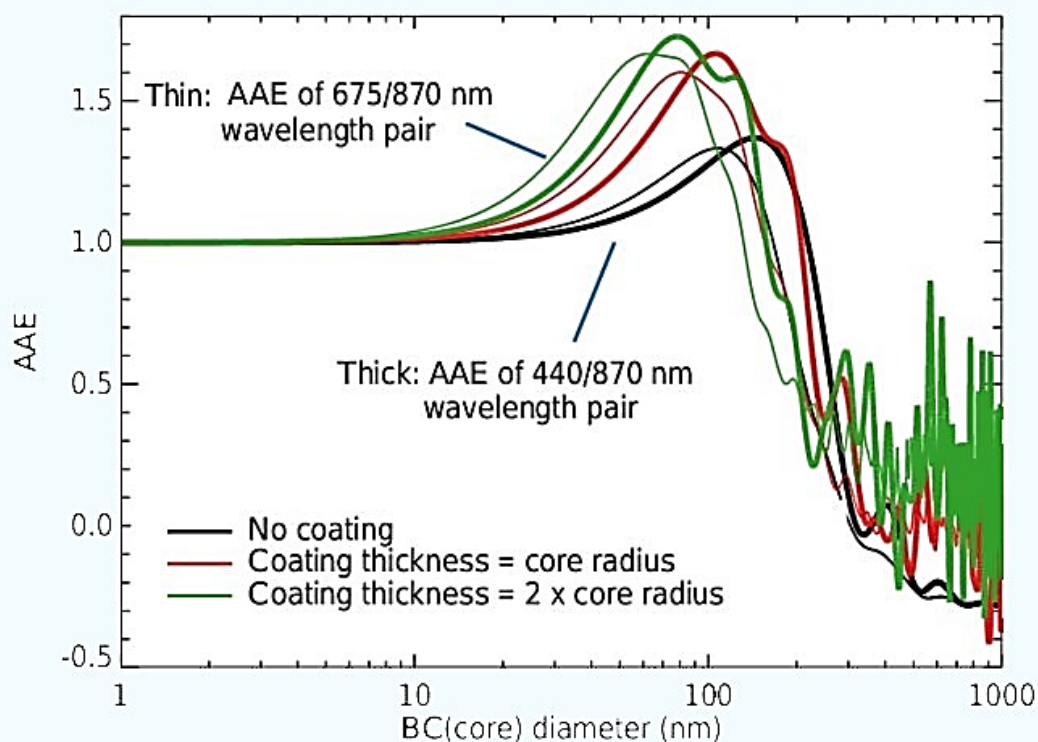
Figura 4 - Ilustração da atribuição de absorção utilizando o expoente de absorção de Ångström (AAE). O *Brown Carbon* domina a absorção para comprimentos de onda próximo do UV. A absorção pelo BC varia pouco com o comprimento de onda.



Fonte: (LACK; LANGRIDGE, 2013)

Atualmente, para se obter dados limitados das medidas de BrC, usa-se este simples método mencionado acima – utilizando o coeficiente de absorção de Ångström - para separar a contribuição de absorção por BC e BrC. Este método é baseado em suposições sobre a dependência espectral de BC que são frequentemente violadas na atmosfera ambiente. Normalmente, assume-se que o coeficiente de absorção de Ångström para o BC é aproximadamente igual a 1. Porém, conforme mostra a Figura 5, (WANG, XUAN et al., 2016) o valor atribuído ao coeficiente de absorção de Ångström calculado através de uma solução de espalhamento Mie é fortemente dependente do tamanho da partícula para partículas acima de 10nm.

Figura 5 - O expoente de absorção de Ångström (AAE) para BC estimado utilizando cálculos da teoria Mie para diferentes *coatings* (revestimentos). Observamos que o AAE do BC pode ser diferente de 1 dependendo do tamanho da partícula. Isso afeta sobremaneira a absorção.



Fonte: WANG, XUAN et al., 2016

Um novo método de obtenção do BrC através de medidas de AAOD foi desenvolvido por WANG, XUAN et al. (2016). Este método considera a dependência das medidas de absorção em função do comprimento de onda e, assim, inclui uma variedade de propriedades de BC relevantes atmosféricamente e que eram desconsideradas em trabalhos anteriores. Aplicamos este método utilizando medidas de absorção e análises de refletância para deposição de aerossol em filtros *Nuclepore* (SPURNY et al., 1969) coletados na Amazônia no sítio ATTO (Observatório da Torre Alta da Amazônia). Também aplicamos o mesmo método em dados de profundidade ótica de absorção de aerossol (AAOD) para vários comprimentos de onda obtidos pela rede mundial da AERONET (GILES et al., 2012), além disso o método também foi aplicado para as medidas de absorção de Aetalômetro coletados no sítio ATTO no mesmo período e em paralelo em 2019. Aplicamos o método em medidas de absorção obtidas com o uso de diferentes técnicas, para mostrar a robustez e confiabilidade dos resultados.

Devido a origem do aerossol carbonáceo, as partículas de BC constantemente são atribuídas a processos por combustão em alta temperatura,

como na queima de combustível diesel, e as partículas de BrC são normalmente atribuídas a processos de combustão a temperaturas menores e com baixa eficiência, tais como na queima de biomassa (FENG et al., 2013). Pensando nisso, analisamos dados *in situ* provenientes da torre ATTO (AM) como nosso sítio de referência com pouca interferência antrópica e, como apoio, utilizamos os dados de fotômetros localizados em Manaus EMBRAPA (AM), Alta Floresta (MT), Ji-Paraná (RO), Cuiabá (MT) e Rio Branco (AC) para a obtenção quantitativa e qualitativa de diferentes processos de geração e de absorção por BrC e BC na Amazônia.

Sabemos que a razão BrC para BC tem forte impacto na absorção espectral da radiação e na forçante radiativa, e ainda não é totalmente compreendida. Este estudo mostra a dependência espectral da absorção do BrC em uma larga faixa de comprimentos de onda (300-2500 nm), o que é único, pois normalmente a literatura apresenta o BrC apenas em comprimentos de onda próximos a 440 nm. Pode-se comprovar, a partir de medidas *in situ*, que a absorção de BrC começa a ser significativa já a partir de 660 nm, se tornando máxima em comprimentos de ondas próximos ao ultravioleta (300-440 nm). Além disso, apresentamos uma análise sazonal, caracterizando o aerossol amazônico absorvedor quanto à porção de BC e BrC em diversos sítios da Amazônia, com longas séries de dados cobrindo mais de 20 anos de medidas.

1.1 Organização deste trabalho

Esta tese está organizada em seis capítulos, nos quais são expostos os objetivos, uma revisão bibliográfica, os materiais e métodos utilizados, os resultados e discussões, e as conclusões.

O primeiro capítulo compreende uma revisão da literatura disponível e a motivação da tese, já no segundo é apresentado o objetivo do estudo. O terceiro apresenta uma breve revisão sobre a absorção da radiação por aerossóis na Amazônia. O quarto capítulo contém a descrição dos componentes fundamentais do sistema e o protocolo que foi seguido. O quinto capítulo trata dos principais resultados e discussões destes com a literatura pertinente, levando em conta a metodologia desenvolvida neste trabalho.

Encerrando, o sexto capítulo apresenta uma conclusão dos resultados obtidos nesta tese de doutorado e as perspectivas futuras de trabalho que vemos para a área específica.

Ao final, são apresentados dois apêndices contendo toda a produção científica no período de elaboração da tese e os trabalhos apresentados em congressos associados com este trabalho. Salientamos a significativa quantidade de trabalhos produzidos - 14 no total -, se incluirmos as medidas de eficiência de coleta de partículas em máscaras que fizemos em decorrência da pandemia da COVID-19. Alguns destes trabalhos tem altas taxas de citações, apesar de serem recentes.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Aprimorar o entendimento do papel das emissões carbonáceas da floresta amazônica na componente de absorção de radiação por partículas, através do uso combinado de sensoriamento remoto e medidas *in situ*.

2.2 Objetivos específicos

- ❖ Utilizando medidas *in situ* (Torre ATTO) e por sensoriamento remoto a partir do solo, analisar a consistência dos diferentes métodos e plataformas de observação para quantificar o papel do BrC e do BC na absorção de radiação por aerossóis.
- ❖ Através do uso de séries temporais de longa duração e matrizes de Ångström em vários sítios experimentais (Alta Floresta, Rio Branco, Ji-Paraná, Manaus, Torre ATTO e Cuiabá), quantificar e comparar a contribuição de BrC e BC em relação à absorção total.
- ❖ Analisar a componente de absorção em largo espectro de radiação (300-2500 nm), quantificando a variação espectral do BrC em partículas de aerossóis coletados na Amazônia.
- ❖ Calcular a forçante radiativa dos aerossóis na Amazônia central, quantificando os efeitos diferenciais do BC e BrC.

3 ABSORÇÃO DE RADIAÇÃO POR AEROSSÓIS NA AMAZÔNIA

3.1 Propriedades óticas dos aerossóis

3.1.1 Interação dos aerossóis com a radiação eletromagnética

Os aerossóis interagem com a radiação eletromagnética incidente de maneira complexa e dependente de uma série de parâmetros físico-químicos (BOUCHER, 2015). Uma parte da radiação é convertida em energia térmica e assim absorvida, enquanto outra parte é espalhada em todas as direções. A interação de uma partícula de aerossol com a radiação incidente depende do comprimento de onda (λ) da radiação e das seções de choque de absorção e espalhamento, S_{abs} e S_{scat} , que representam a superfície que efetivamente interage com a radiação. Quando as partículas são muito pequenas em comparação ao comprimento de onda da radiação incidente (na prática, nos casos em que o diâmetro de partícula é menor que $\lambda/5$), a energia absorvida ou espalhada por ela é proporcional à sua seção de choque, onde:

$$I_{scat}(\lambda) = S_{scat}(\lambda) I_0(\lambda) \quad (3.1)$$

$$I_{abs}(\lambda) = S_{abs}(\lambda) I_0(\lambda) \quad (3.2)$$

na qual I_{scat} e I_{abs} são, respectivamente, a intensidade de radiação espalhada e absorvida, I_0 é a intensidade de radiação incidente, ambos em W/m^2 e S_{scat} e S_{abs} representam a seção de choque de espalhamento e absorção em unidade de m^2 . Sendo que, no regime de Rayleigh, a razão I/I_0 é proporcional a $1/\lambda^4$.

A dinâmica de espalhamento e absorção da radiação nos aerossóis (SEINFELD et al., 1998) dependem do comprimento de onda (λ) da radiação incidente e do tamanho da partícula, diâmetro D_p . O parâmetro de tamanho κ define o regime de interação da seguinte forma:

$$\kappa = \frac{\pi D_p}{\lambda} \quad (3.3)$$

Para os casos em que κ é muito menor do que 1, domina o regime de Rayleigh já mencionado, onde as partículas são menores do que o comprimento de onda da radiação incidente. Quando κ é aproximadamente igual a 1, domina o

regime de Mie, onde as partículas são da mesma ordem do comprimento de onda. E, finalmente, quando o κ é muito maior do que 1, significa que o regime geométrico é dominante, onde as partículas são muito maiores do que o comprimento de onda incidente.

As eficiências de espalhamento e absorção de uma partícula, Q_{scat} e Q_{abs} , são definidas como a razão entre a seção de choque de espalhamento ou absorção e a área geométrica da seção de choque s_g da partícula:

$$Q_{\text{scat}}(\lambda) = \frac{S_{\text{scat}}(\lambda)}{s_g} \quad (3.4)$$

$$Q_{\text{abs}}(\lambda) = \frac{S_{\text{abs}}(\lambda)}{s_g} \quad (3.5)$$

A partir das eficiências de espalhamento e absorção, a conservação de energia leva a definição de eficiência de extinção, Q_{ext} :

$$Q_{\text{ext}}(\lambda) = Q_{\text{scat}}(\lambda) + Q_{\text{abs}}(\lambda) \quad (3.6)$$

A razão entre Q_{scat} e Q_{ext} é definida como o albedo de espalhamento simples (SSA) ω_0 , que é uma das propriedades espectrais mais críticas do aerossol, uma vez que influencia diretamente a forçante radiativa do aerossol (MOOSMÜLLER; SORENSEN, 2018).

$$\omega_0(\lambda) = \frac{Q_{\text{scat}}(\lambda)}{Q_{\text{ext}}(\lambda)} \quad (3.7)$$

Os valores de ω_0 variam de 0 a 1, onde valores próximos a 1 referem-se a aerossóis fortemente espalhadores e valores muito próximos de 0 referem-se a aerossóis fortemente absorvedores.

3.1.2 Coeficientes de espalhamento e absorção

Os coeficientes de espalhamento e absorção do aerossol, respectivamente $\sigma_{\text{scat},\lambda}$ e $\sigma_{\text{abs},\lambda}$ (unidade 1/m), são dependentes do comprimento de onda λ , os quais

possuem propriedades que são diretamente relacionadas ao tipo de aerossol na atmosfera e são definidos da seguinte forma:

$$\sigma_{\text{scat},\lambda} = \int_0^{\infty} \frac{\pi D^2 p}{4} Q_{\text{scat}}(Dp) n(Dp) d(Dp) \quad (3.8)$$

$$\sigma_{\text{abs},\lambda} = \int_0^{\infty} \frac{\pi D^2 p}{4} Q_{\text{abs}}(Dp) n(Dp) d(Dp) \quad (3.9)$$

Desta forma, o coeficiente de extinção $\sigma_{\text{ext},\lambda}$ é definido como:

$$\sigma_{\text{ext},\lambda} = \sigma_{\text{scat},\lambda} + \sigma_{\text{abs},\lambda} \quad (3.10)$$

O albedo de espalhamento simples ω_0 já definido na equação 3.7 também pode ser obtido com as medidas de coeficiente de espalhamento e absorção, o que é muito útil, pois são alguns exemplos de medidas realizadas pelos equipamentos que usamos neste trabalho e pode ser também definido como:

$$\omega_0(\lambda) = \frac{\sigma_{\text{scat},\lambda}}{\sigma_{\text{ext},\lambda}} \quad (3.11)$$

3.1.3 Profundidade ótica de aerossol

A profundidade ótica do aerossol (AOD) pode ser definida a partir da integral do coeficiente de extinção σ_{ext} sobre o perfil vertical atmosférico (YAMASOE, M.; DE PAULA CORREA, 2016), assim:

$$\text{AOD} = \int_{\text{superfície}}^{\text{topo da atmosfera}} \sigma_{\text{ext}}(z) dz \quad (3.12)$$

Esse parâmetro avalia toda a camada atmosférica de aerossóis, desde a base onde o fotômetro está localizado até o topo da atmosfera (TOA, ~100 km), fornecendo a componente AOD, onde podem ser derivadas muitas outras propriedades óticas dos aerossóis, as quais serão detalhadas no capítulo 4 desta tese. TOA é definido como a região da atmosfera onde a concentração de moléculas de ar é tão rarefeita que não interage significativamente com a radiação que sai ou entra no planeta.

É importante salientar que, rigorosamente falando, há uma diferença entre AOD e espessura ótica de aerossol (AOT). O AOD representa a coordenada vertical, enquanto AOT se refere a integral, desde a superfície até o topo da atmosfera. Na prática, o termo AOD é frequentemente usado para significar AOT e nós seguiremos esta aplicação na elaboração desta tese (BOUCHER, 2015).

3.1.4 Coeficientes de espalhamento e absorção de massa

Ao analisar populações de aerossóis, muitas vezes é útil trabalhar com parâmetros que descrevem a eficácia com que uma determinada quantidade de partículas espalha ou absorve a radiação. Portanto, o coeficiente de espalhamento de massa, α_{scat} , e o coeficiente de absorção de massa (MAC, do inglês *Mass Absorption Coefficient*), α_{abs} , são definidos em unidades de m^2/g conforme a equação:

$$\alpha_{\text{scat}} = \frac{\sigma_{\text{scat},\lambda}}{m} \quad (3.13)$$

$$\alpha_{\text{abs}} = \frac{\sigma_{\text{abs},\lambda}}{m} \quad (3.14)$$

onde m é a massa total das partículas. Diferentes instrumentos óticos usam diferentes MAC, pois isso depende de como eles foram calibrados para converter a medida da absorção em medida de massa de aerossóis absorvedores (RIZZO et al., 2011). No Capítulo 4 desta tese, abordaremos como foram feitas essas calibrações para os instrumentos utilizados no presente trabalho.

3.1.5 Função de fase

Os parâmetros de espalhamento e absorção não são suficientes para caracterizar totalmente a interação da radiação eletromagnética com as partículas. É necessário saber como a radiação é espalhada e a função de fase descreve a distribuição angular da radiação espalhada (BOUCHER, 2015), o que significa que ao interagir com o aerossol, o feixe de radiação é espalhado em uma direção Θ , que depende da geometria da partícula. A função de fase descreve a distribuição angular da intensidade de radiação espalhada em relação ao ângulo de espalhamento Θ . A função de fase é definida como a razão da intensidade espalhada $I(\Theta)$ pela radiação incidente total:

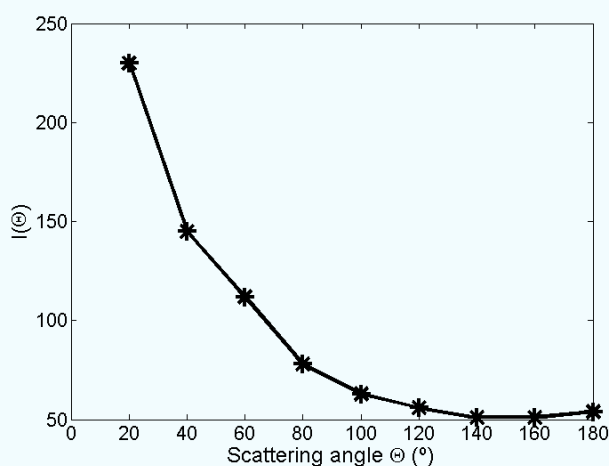
$$P(\Theta) = \frac{I(\Theta)}{\int_0^\pi I(\Theta)\text{sen}(\Theta)d\Theta} \quad (3.14)$$

A função de fase é normalizada ao integrá-la sobre o ângulo sólido $d\Omega$, considerando uma esfera centrada na partícula:

$$\int_0^{2\pi} \int_0^\pi P(\Theta)\text{sen}(\Theta)d\Theta d\phi = 4\pi \quad (3.15)$$

A Figura 6 mostra um exemplo real de como a intensidade espalhada $I(\Theta)$ varia com Θ . A curva foi obtida medindo a variação da intensidade da luz através de um polarizador na cidade de São Paulo (SP). Como era esperado, observamos que a intensidade diminui à medida que o ângulo tende a 180° .

Figura 6 - Intensidade de radiação espalhada em função do ângulo de espalhamento Θ para medidas em campo das propriedades óticas dos aerossóis na cidade de São Paulo. Os dados foram obtidos em 30 de julho de 2019, às 9:40 LT, utilizando um conjunto composto por um polarizador e um smartphone, apresentado no SPSAS (*Sao Paulo School of Advanced Science on Atmospheric Aerosols*): propriedades, medições, modelagem e efeitos sobre o clima e saúde, realizado na Universidade de São Paulo (USP).



Fonte: (FRANCO, M. A. DE M., 2021). Dados obtidos e apresentados por Fernando G. Morais, Marco A. Franco, Delano Campos e Milena Ponczek no SPSAS 2019

As medidas foram obtidas a partir de um polarizador caseiro e um sensor de smartphone. Apesar da simplicidade do arranjo experimental, demonstra muito bem o princípio da função de fase.

3.1.6 Índice de refração

O índice de refração é um importante parâmetro para caracterizar o aerossol, pois combina informações de tamanho e forma, as quais podem em princípio ser usadas para caracterizar as propriedades óticas do aerossol (BOUCHER, 2015). Essas informações desempenham um papel fundamental na interação do aerossol com a radiação eletromagnética, associada ao índice de refração $N_{\text{ref}}(\lambda)$ do material da seguinte forma:

$$N_{\text{ref}}(\lambda) = n_{\text{ref}}(\lambda) + ik_{\text{ref}}(\lambda) \quad (3.16)$$

onde n_{ref} é a parte real, associada às propriedades de espalhamento do aerossol e k_{ref} é a parte imaginária, que está associada à componente absorvedora da partícula.

O *Black Carbon* tem um índice de refração de $1.95-0.79i$ ($\lambda = 550$ nm), o que mostra sua forte componente absorvedora, o que é bem diferente do índice de refração do *Dust* (partículas de poeira mineral) de $1.56-0.006i$ ($\lambda = 550$ nm), o qual apresenta uma componente de absorção mínima.

3.1.7 Expoente de Ångström

As propriedades óticas do aerossol dependem do comprimento de onda da radiação e do AOD. As variações em função do comprimento de onda podem ser substanciais, o que mostra o quão importante é sempre especificar o AOD associado a um determinado comprimento de onda. O expoente de Ångström (Å), também chamado de coeficiente ou parâmetro de Ångström, mede a dependência espectral do AOD ou do coeficiente de extinção. Ele é calculado da seguinte forma:

$$\mathring{a}_{\lambda_i, j} = - \frac{\ln \frac{\sigma_{\lambda_i}}{\sigma_{\lambda_j}}}{\ln \frac{\lambda_i}{\lambda_j}} \quad (3.17)$$

O expoente de Ångström pode ser descrito em termos do coeficiente de espalhamento ou absorção, e cada um deles representa um diferente aspecto da população de aerossóis atmosféricos. Assim, σ_{λ} pode ser tanto o coeficiente de espalhamento quanto absorção, os quais normalmente são medidos em três

comprimentos de onda, ou mais. Também é possível obter o expoente de Ångström por meio do seguinte ajuste linear:

$$\ln \sigma_{\lambda} = -a \ln \lambda + C \quad (3.18)$$

onde σ_{λ} é o coeficiente de espalhamento ou absorção, a média do expoente de Ångström é o coeficiente angular a e C é uma constante resultante do ajuste linear.

O expoente de espalhamento de Ångström (SAE) varia de 0 a 4 e pode estar associado com o tamanho das partículas. De acordo com (BOUCHER, 2015) SAE ~ 4 está associado ao espalhamento por moléculas, SAE ~ 2 geralmente está relacionado ao espalhamento de partículas da moda de acumulação (partículas que variam tamanho de 0.1 a 1 μm) e SAE ~ 0 pode estar relacionado a aerossóis da moda grossa (partículas maiores que 1 μm).

O expoente de absorção Ångström (AAE) está diretamente associado com composição química e envelhecimento do aerossol. Os valores de AAE ~ 1 são geralmente associados a aerossóis muito absorvedores, embora possa variar por um efeito de revestimento (WANG, XUAN et al., 2016). Em geral, aerossóis orgânicos e *Dust* têm AAE mais altos. Os expoentes de Ångström têm sido usados para discriminar os diferentes tipos de aerossóis absorventes por meio de agrupamentos de *cluster* (CAPPA et al., 2016; CAZORLA et al., 2013). Esta técnica, chamada de matriz de Ångström, fornece evidências relacionadas ao tipo de mistura de aerossol apenas com base nas medições óticas, por exemplo, se a dominância é de *Black Carbon*, *Brown Carbon* ou *Dust* (FRANCO, M. A. DE M., 2021).

3.2 **Black Carbon**

O *Black Carbon* (BC) é uma espécie de aerossol com propriedades únicas. É produzido durante a combustão de combustíveis de longa cadeia de carbono, onde e quando a combustão é incompleta por falta de oxigênio (BOUCHER, 2015). Combustões incompletas são comuns, por exemplo, pela queima de biomassa, em fornos a lenha ou até mesmo na maioria dos motores a combustão. A cadeia de reação começa com a produção de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos, que servem como núcleos para formar pequenas partículas esféricas de alguns

nanômetros com camadas de grafite e uma grande razão C: H (BOND, T. C. et al., 2013). Estas esferas coagulam para formar o *Black Carbon*.

3.2.1 Propriedades do *Black Carbon*

Os valores da densidade do BC podem variar com as condições de combustão. (BOND, TAMI C.; BERGSTROM, 2006) recomendam um valor de 1.7 a 1.9 g/cm³. O tamanho das partículas de BC varia com o tipo de fonte, mas é tipicamente de 100 nm. Absorve fortemente a luz visível com uma seção de choque de absorção de massa de pelo menos 5 m²/g ($\lambda = 550$ nm). O BC é refratário, pois mantém a sua forma básica ao ser submetido a altas temperaturas, tendo uma temperatura de vaporização próxima a 3700 °C. É insolúvel em água, em solventes orgânicos, incluindo metanol e acetona. Existe em geral, como um agregado de pequenas esferas de carbono.

A eficiente absorção de radiação visível do BC é uma característica distintiva que têm despertado o interesse em estudos de transferência radiativa atmosférica (PALÁCIOS et al., 2020; RIZZO et al., 2011; SENA et al., 2013). Nenhuma outra substância presente na atmosfera em quantidades significativas absorve a radiação por unidade de massa de maneira tão eficiente. Além disso o BC tem reatividade química muito baixa na atmosfera, assim seu processo de remoção da atmosfera é por remoção úmida ou deposição seca na superfície (BOND, T. C. et al., 2013).

O BC pode muito rapidamente ficar encapsulado com carbono orgânico e sulfato que se condensam na superfície. Isso cria uma mistura interna que modifica a microfísica e as propriedades óticas do BC, o tornando mais higroscópico (BOUCHER, 2015). A forçante radiativa direta (DRF) do BC é causada pela absorção e espalhamento da luz solar. A absorção aquece a atmosfera onde o BC está presente e reduz a intensidade da luz do sol que atinge a superfície, enquanto o espalhamento pode refletir a luz de volta para o espaço. É importante salientar que um estudo detalhado sobre *Black Carbon* e seus efeitos na atmosfera pode ser encontrado em BOND, T. C. et al. (2013).

3.3 *Brown Carbon*

O *Brown Carbon* (BrC) é definido como a matéria orgânica que absorve radiação eletromagnética e que não é BC em aerossóis atmosféricos. A produção do BrC é observada pela queima parcial de hidrocarbonetos como materiais de alcatrão (combustão lenta) e oxidação induzida pela radiação solar de material biogênico. BrC é um grande conjunto de compostos orgânicos, com substâncias do tipo húmico (HULIS), hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (PAHs), lignina e bioaerossóis (ANDREAE; GELENCSEÉR, 2006; SONWANI et al., 2021). Mais recentemente, o BrC tem atraído o interesse da comunidade científica pois impacta o balanço radiativo, e portanto as mudanças climáticas (FENG et al., 2013; YAN et al., 2018).

3.3.1 Propriedades do *Brown Carbon*

Algumas propriedades óticas do aerossol podem ser calculadas a partir da teoria de Mie (BOHREN; HUFFMAN, 1998), assumindo partículas esféricas. Assim, valores de índice de refração podem ser derivados para coincidir com as seções de choque de absorção observadas em 500 nm, $0.08 \text{ m}^2/\text{g}$ para BrC moderadamente absorvedor (CHEN; BOND, 2010) e $\sim 0.7 \text{ m}^2/\text{g}$ para BrC fortemente absorvedor (KIRCHSTETTER et al., 2004). Nos cálculos Mie, a densidade do BrC é $\sim 1.57 \text{ g}/\text{cm}^3$ e a parte real de seu índice de refração é 1.65 (HOFFER et al., 2006). Em uma distribuição de tamanho típica de aerossóis para a queima de combustível, o BrC apresenta um diâmetro médio de 100 nm e desvio padrão de 1.5 (BOND, TAMM C.; BERGSTROM, 2006). Do ponto de vista termoquímico, o BrC é um aerossol refratário e não evapora até $400 \text{ }^\circ\text{C}$ quando em condição atmosférica inerte (CHOW et al., 2015; YAN et al., 2018).

Muitos estudos indicaram que a precisão da avaliação dos efeitos climáticos pode ser melhorada incluindo a absorção de BrC em modelos climáticos (CHUNG et al., 2012; HAMMER et al., 2016). A absorção de BrC insere um efeito de aquecimento no topo da atmosfera de $+0.11 \text{ W}/\text{m}^2$ em relação ao efeito puramente de espalhamento do carbono orgânico (FENG et al., 2013). No entanto, WANG XUAN et al. (2018) sugeriu que a forçante radiativa de BrC pode ter sido superestimada anteriormente devido ao viés entre observações e simulações (SONWANI et al., 2021; YAN et al., 2018).

3.4 A Bacia Amazônica

A Bacia Amazônica é a maior floresta tropical do mundo, localizada na Bolívia, Guiana, Suriname, Colômbia, Peru, Brasil, Equador e Venezuela (GOULDING et al., 2003). Alguns estudos relataram as propriedades, distribuição e impacto do BrC na Bacia (HOFFER et al., 2006; WANG, XUAN et al., 2016). MOK et al. (2016) mencionou que as propriedades óticas do aerossol obtidas a partir de bases terrestres e do sensoriamento remoto mostram que a queima de biomassa da floresta amazônica e terras agrícolas na América do Sul são responsáveis pela grande contribuição do BrC na absorção da radiação eletromagnética. Este estudo também mencionou que as propriedades óticas do aerossol de BrC mudam de maneira sutil os efeitos geralmente adversos da fumaça da queima de biomassa.

Alguns estudos identificam incêndios florestais regionais como as principais fontes de emissão de BrC, sendo que possuem um impacto substancial na estação seca (RIZZO et al., 2011, 2013). Propriedades características de absorção de BrC nesta região são relatados com $MAC = 0.4 \text{ m}^2/\text{g}$ a 532 nm e $AAE = 1.5 - 1.2$. Outro estudo na Bacia Amazônica mostra a absorção relativamente maior em 350-400 nm e relata $MAC = 0.5 \text{ m}^2/\text{g}$ e $AAE = 6-7$ (HOFFER et al., 2006).

Hoffer et al, (2006) também menciona que a determinação de HULIS em amostras de carbono orgânico solúvel em água (WSOC) predominou por emissões de queima de biomassa e emissão biogênica (resultado do metabolismo da planta) contendo compostos orgânicos, resultando na formação de grandes macromoléculas de HULIS na Bacia Amazônica (HOFFER et al., 2006).

Vemos que, devido à forte capacidade de absorção de radiação do BrC, ele pode ter vários efeitos adversos no clima e no meio ambiente. Para compreender as propriedades higroscópicas, estado de mistura e processos de envelhecimento do BrC, mais pesquisas são cruciais para alcançar a modelagem exata da forçante radiativa. Uma melhor compreensão sobre os constituintes e morfologia típica de BrC ainda se faz necessária e a consequência ambiental do BrC também precisa de mais investigação, para obter uma avaliação precisa de seus efeitos ambientais e no clima (SONWANI et al., 2021; YAN et al., 2018).

4 METODOLOGIA

Para a realização deste estudo, utilizamos as medidas de profundidade ótica de aerossol (AOD) e profundidade ótica de absorção de aerossóis (AAOD) dos fotômetros solares CIMEL, da rede AERONET. Para as medidas *in situ*, utilizamos as medidas de absorção em Aetalômetros (medida espectral), MAAP (*Multi Angle Absorption Photometer*) e as análises espectrais de absorção em filtro Nuclepore com espectrômetro ótico de alta resolução para quantificar a dependência espectral do BC e BrC. Complementar a estas medidas, utilizamos análises da série temporal de espalhamento de aerossol utilizando Nefelômetros, distribuições de tamanho de aerossol através de SMPS e OPS, análises de composição química de aerossol utilizando ACSM em tempo real e análises por Fluorescência de Raio x. Além disso, também observamos a morfologia das partículas coletadas através de Microscopia Eletrônica de Varredura.

4.1 Medidas por sensoriamento remoto através da rede AERONET

A rede AERONET (HOLBEN et al., 1998) é uma rede global de monitoramento de aerossóis por sensoriamento remoto em solo, mantida pelo sistema EOS (*Earth Observing System*) da NASA e expandida por colaboradores de agências nacionais, institutos, universidades e parceiros. A Figura 7 mostra a localização dos fotômetros da rede AERONET em operação atualmente e que foram utilizados neste trabalho.

Os equipamentos da AERONET consistem em radiômetros espectrais solares automáticos, modelos CIMEL Eletronic 318A e 318T, cujas medidas permitem o monitoramento em tempo quase real de parâmetros como AOD e outras propriedades derivadas de inversão, como distribuição de tamanho, SSA, AAOD, entre outros. Estes produtos podem ser livremente acessados a partir do endereço <https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>, onde também estão disponíveis informações adicionais sobre o sistema.

Figura 7- Localização dos fotômetros solares da rede AERONET na Amazônia. O sítio do ATTO, além do fotômetro da rede AERONET, contém também um parque de equipamentos para medidas em solo.



Fonte: Fernando G. Morais.

O fotômetro CIMEL possui dois colimadores correspondentes a dois sensores, como pode ser visto na Figura 8. Um sensor é utilizado para a medida de radiância do Sol e outro para medidas de radiância do céu. O primeiro possui 8 filtros de comprimentos de onda de 340, 380, 440, 500, 670, 875, 1020 e 936 nm, sendo que este último é utilizado apenas para derivar quantidade de vapor d'água na atmosfera. Já o segundo sensor possui filtros de comprimento de onda de 440, 670, 875 e 1020 nm. Os sensores se movimentam no sentido dos ângulos zenital e azimutal com o auxílio de motores de passo com uma precisão de 0,05 graus. Um microprocessador calcula a posição do Sol baseado em informações de hora, latitude e longitude, direcionando os colimadores a menos de 1° do Sol. Um pequeno detector localiza precisamente o Sol para que se dê início à sequência de medidas. Após o término das medidas, o instrumento retorna à posição de repouso,

apontando aproximadamente para o nadir. Um sensor de umidade cancela qualquer sequência de medidas em caso de precipitação (HOLBEN et al., 1998).

Figura 8 - Fotômetro solar instalado no topo de uma torre de 80m na Amazônia (ATTO). Medidas da espessura ótica de aerossóis e propriedades físicas em vários comprimentos de onda são feitas continuamente.



Fonte: Fernando G. Morais

Os equipamentos da rede consistem em radiômetros espectrais automáticos e similares distribuídos pelo globo, cujas medidas permitem o monitoramento em tempo quase real do AOD, da distribuição de tamanho das partículas e do vapor d'água precipitável, entre outros.

A atenuação de luz devido ao espalhamento Rayleigh e a absorção pelo ozônio e por outros gases que possam interferir nas medidas são estimadas e removidas para a determinação da espessura ótica devido apenas aos aerossóis. Para diferenciar os aerossóis das nuvens, três medidas são feitas em sequência a cada 15 minutos para cada comprimento de onda, com um intervalo de 30 segundos entre elas, uma vez que a variação temporal das nuvens é bem maior que a dos aerossóis (YAMASOE, M. A., 1999).

O algoritmo leva em consideração as medidas diretas e indiretas (inversões). Medidas diretas são obtidas a partir da radiância direta ($W/sr.m^2$), feitas com o

colimador do radiômetro apontado para o disco solar, fornecendo dados sobre AOD e o expoente de Ångström. O AOD é a soma dos efeitos de espalhamento e absorção pela partícula de aerossol e é obtida da lei Lambert-Beer-Bouguer. O expoente de Ångström (α) representa a dependência espectral do AOD e é obtida a partir da equação:

$$\alpha = \frac{\ln(\text{AOD})}{\ln\beta\lambda} \quad 4.1$$

onde λ é o comprimento de onda da radiação eletromagnética e β é o coeficiente de turbidez de Ångström. A medida da turbidez da atmosfera é igual ao AOD em um comprimento de onda de 1 μm .

Medidas indiretas, obtidas por inversões a partir de dados de radiação difusa, nos permitem conhecer a distribuição de tamanho dos aerossóis, o índice de refração da partícula (obtido com as componentes de espalhamento e absorção), o expoente de absorção de Ångström (AAE), o expoente de espalhamento de Ångström (SAE) e a função de fase (440, 670, 870, 1020 nm).

Neste estudo, utilizamos os dados da rede AERONET para calcular a fração de BC e BrC a partir de dados de AAOD em 440nm na Amazônia, a elaboração de matrizes de Ångström sazonais utilizando dados de SAE e AAE e a função de fase para o cálculo da forçante radiativa dos aerossóis carbonáceos. Foram utilizados dados de nível 1.5 e 2.0 da rede AERONET, com preferência para o nível 2.0. Vale ressaltar que os instrumentos da rede AERONET retornam à NASA aproximadamente a cada ano para calibração, validação dos dados, manutenção e testes.

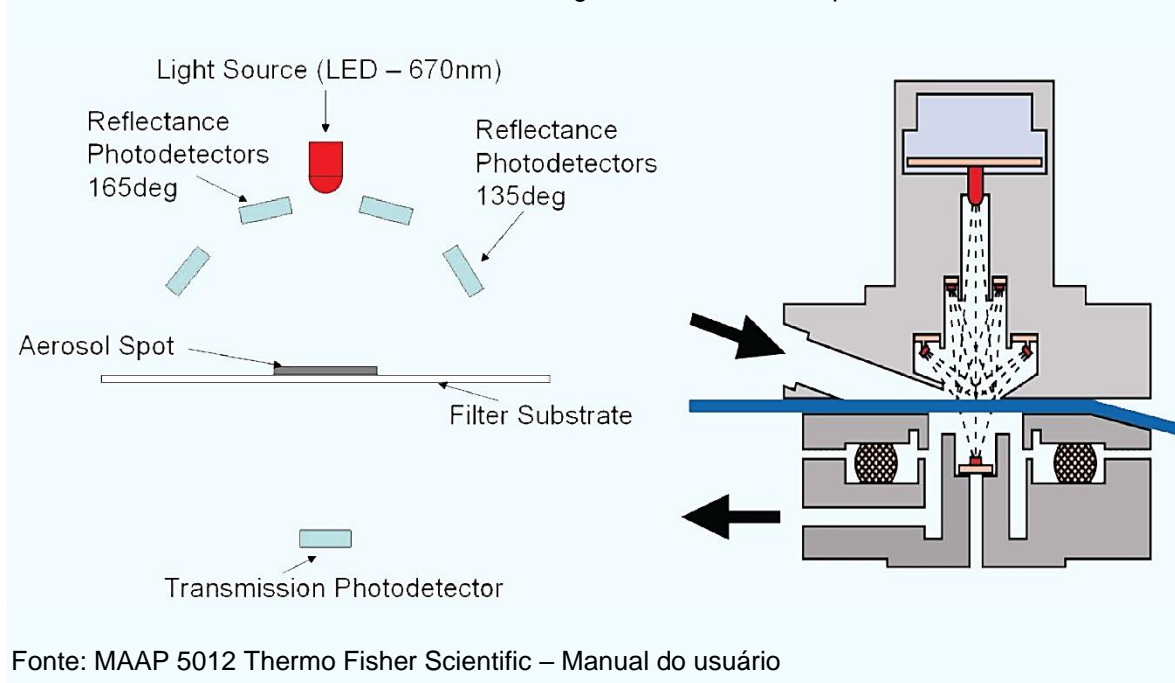
4.2 Medidas *in situ*

4.2.1 Medidas de *Black Carbon* equivalente em tempo real com o MAAP

O MAAP (Fotômetro de absorção multi-ângulo), modelo 5012 da Thermo Scientific, é um instrumento que mede em tempo real a concentração de *Black Carbon* (PETZOLD, A. et al., 2002). Esta propriedade torna possível a determinação de sua concentração, por meio da medida da atenuação de um feixe de luz transmitido através de um filtro de partículas (PETZOLD, ANDREAS;

SCHÖNLINNER, 2004). O instrumento realiza o cálculo de transferência radiativa no próprio filtro de fibra de vidro e desconta o espalhamento óptico para a medida exclusiva da absorção. Os valores de coeficiente de absorção σ_{abs} compensados por um fator +5% são convertidos para concentração de *Black Carbon* equivalente (BCe), em $\mu\text{g}/\text{m}^3$, assumindo uma eficiência de absorção em massa igual a $6.6 \text{ m}^2/\text{g}$. O LED do instrumento tem um comprimento de onda de 637 nm (MÜLLER et al., 2011). A resolução temporal do MAAP foi ajustada para 10 minutos, permitindo o estudo da evolução temporal das componentes de partículas de aerossol absorvedoras de radiação na faixa do visível (SANTOS JUNIOR, 2021). A Figura 9 apresenta seu funcionamento de forma esquemática. Informações adicionais sobre a operação e os procedimentos de calibração do instrumento podem ser encontrados em RIZZO et al. (2013).

Figura 9 - Princípio esquemático de funcionamento do instrumento MAAP para a medida em tempo real de BC. Simultaneamente à medida de absorção em um filtro de fibra de vidro, o espalhamento óptico é determinado e descontado através de algoritmo desenvolvido para o instrumento.

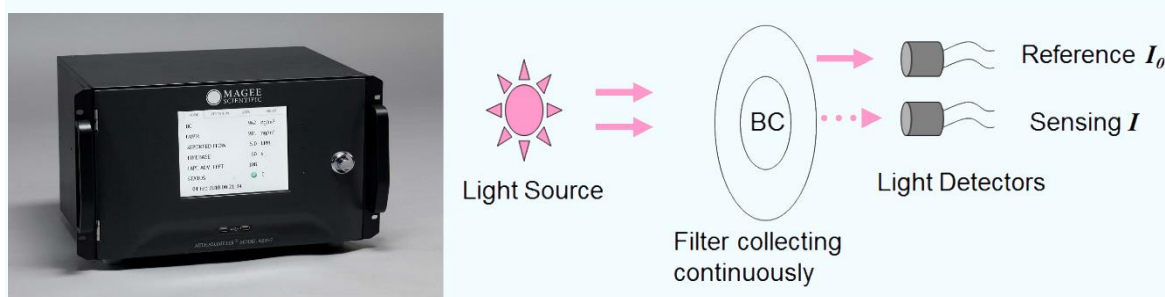


4.2.2 A medida espectral da absorção com o Aetalômetro

O princípio de funcionamento do Aetalômetro é medir a atenuação de um feixe de luz transmitida por um filtro que está continuamente coletando amostra de aerossol (DRINOVEC et al., 2015). A medida é feita em sucessivos intervalos regulares de tempo. Desta forma, o aumento da atenuação óptica de um período

para outro é devido ao incremento de BC coletado pela corrente de ar que passa pelo filtro neste período. Dividindo este incremento de partículas pelo volume de ar amostrado, é possível calcular a concentração do BC. A fonte de luz no modelo AE-33 é um par de lâmpadas LED de alta intensidade, que emite radiação em sete comprimentos de onda (370 nm ~ 950 nm). Esta luz é então detectada por um fotodiodo posicionado diretamente abaixo do filtro. A Figura 10 mostra o instrumento e o princípio de funcionamento do Aetalômetro, respectivamente. Os dados de Aetalômetro AE33 foram corrigidos para o espalhamento e carga de aerossóis do filtro, por técnicas descritas por MÜLLER et al. (2011) e RIZZO et al. (2011).

Figura 10 - Aetalômetro modelo AE 33, que mede absorção em 7 comprimentos de onda, e princípio de funcionamento do Aetalômetro modelo AE33, com dois feixes de referência de medidas para cálculos de correções de *loading* de BC.



Fonte: Magee Scientific - Manual

Aetalômetros medem a atenuação da luz através de uma fita/filtro, no qual são depositadas partículas de aerossol, comparando com a intensidade da luz transmitida através da fita sem material depositado. O coeficiente de atenuação é dado por:

$$\sigma_{\text{ATN}} = \left(\frac{A_f}{Q} \right) \left(\frac{\Delta_{\text{ATN}}}{\Delta t} \right) \quad 4.2$$

onde A_f é a área do filtro, Q é o fluxo volumétrico de amostragem e Δ_{ATN} é a variação na atenuação durante um intervalo de tempo Δt . O coeficiente de absorção do aerossol (σ_{abs}) pode ser obtido a partir de medidas do coeficiente de atenuação com Aetalômetros, através das correções propostas por Weingartner e Rizzo (RIZZO et al., 2011; WEINGARTNER et al., 2003). Neste trabalho foi utilizado o Aetalômetro AE33 (DRINOVEC et al., 2015), que permite a determinação

simultânea dos coeficientes de atenuação em 7 comprimentos de onda (370,470, 520, 590, 660, 880 e 950 nm), possibilitando a análise do espectro de absorção de aerossóis e determinação de parâmetros óticos intensivos, como o expoente Ångström de absorção. As concentrações de BCe são calculadas a partir da variação na atenuação de luz em 880 nm, utilizando a seção de choque de absorção por massa igual a 7.77 m²/g. Neste comprimento de onda, a contribuição de outras espécies de aerossol para a absorção é considerada insignificante (SANTOS JUNIOR, 2021).

4.2.3 A medida espectral do espalhamento com o Nefelômetro

O nefelômetro é um instrumento desenvolvido para medir a radiação espalhada por aerossóis através da obtenção dos coeficientes de espalhamento, σ_{scat} , e retro espalhamento, σ_{bsc} . O aerossol amostrado é bombeado para o equipamento, no qual há um conjunto de LEDs que irradiam as partículas de forma a medir σ_{scat} e σ_{bsc} simultaneamente em três comprimentos de onda: 450, 525 e 635 nm. O princípio de funcionamento do instrumento é baseado na suposição de que a luz dentro da câmara de medição é atenuada tanto por espalhamento como por absorção, devido a partículas e gases. De acordo com Gordon e Johnson (GORDON; JOHNSON, 1985), neste caso, a contribuição da absorção pode ser desprezada porque o ar atmosférico é composto principalmente de N₂ e O₂, que não absorve significativamente na faixa espectral medida pelo nefelômetro. O gás mais significativo, em tal caso, seria O₃, mas representa apenas 4 x 10⁻⁶ % da composição do ar atmosférico (FRANCO, M. A. DE M., 2021).

O coeficiente de espalhamento total medido pelo detector é definido como:

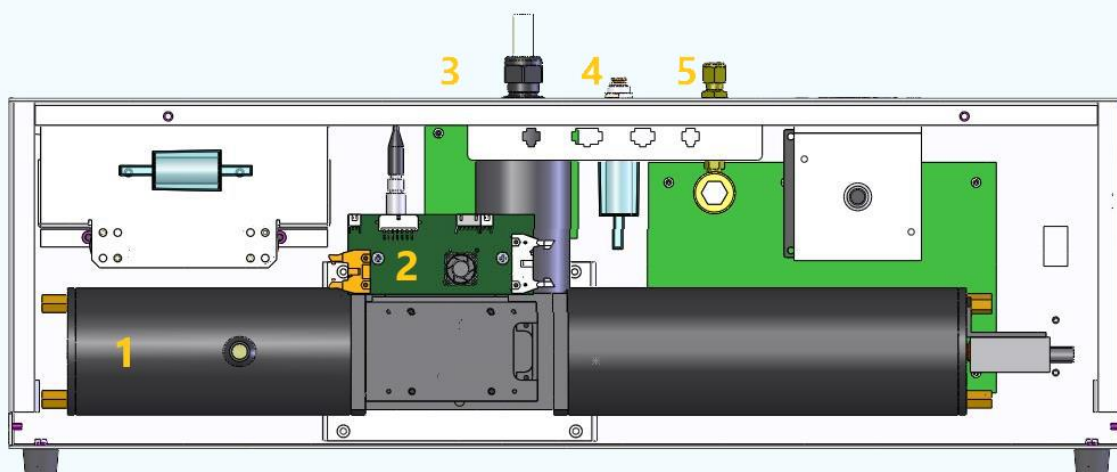
$$\sigma_{\text{tot}}^{\lambda} = 2\pi \int_0^{\pi} f^{\lambda}(\theta) \sin(\theta) d\theta \quad 4.3$$

onde $f(\lambda, \theta)$ é a função de espalhamento, que é dependente do comprimento de onda da radiação incidente e representa a energia espalhada variando em um ângulo θ . A componente de espalhamento total é composta de duas partes: um espalhamento direto ($0 \leq \theta \leq \pi/2$) e o retro espalhamento ($\pi/2 \leq \theta \leq \pi$).

Nefelômetros comerciais como os usados no sítio experimental do ATTO (Aurora 3000 *Multi Wavelength*) medem o coeficiente de espalhamento não apenas

entre 0 e $\pi/2$, mas dentro do semi-hemisfério de 0 a π , devido à disposição dos defletores. O retro espalhamento é medido quando a dispersão direta é bloqueada através de um obturador, permitindo medições dentro de um ângulo de $\pi/2$ para π . As partes internas do referido nefelômetro podem ser observadas na Figura 11.

Figura 11 - Componentes internos de um nefelômetro Aurora 3000, onde 1) é a câmara de medição, 2) fonte de luz, 3) conexão de entrada para o ar amostrado, 4) conexão de filtro para procedimentos zero e 5) conexão de gás de calibração.



Fonte: Aurora 3000 Manual do Usuário, versão 1.5

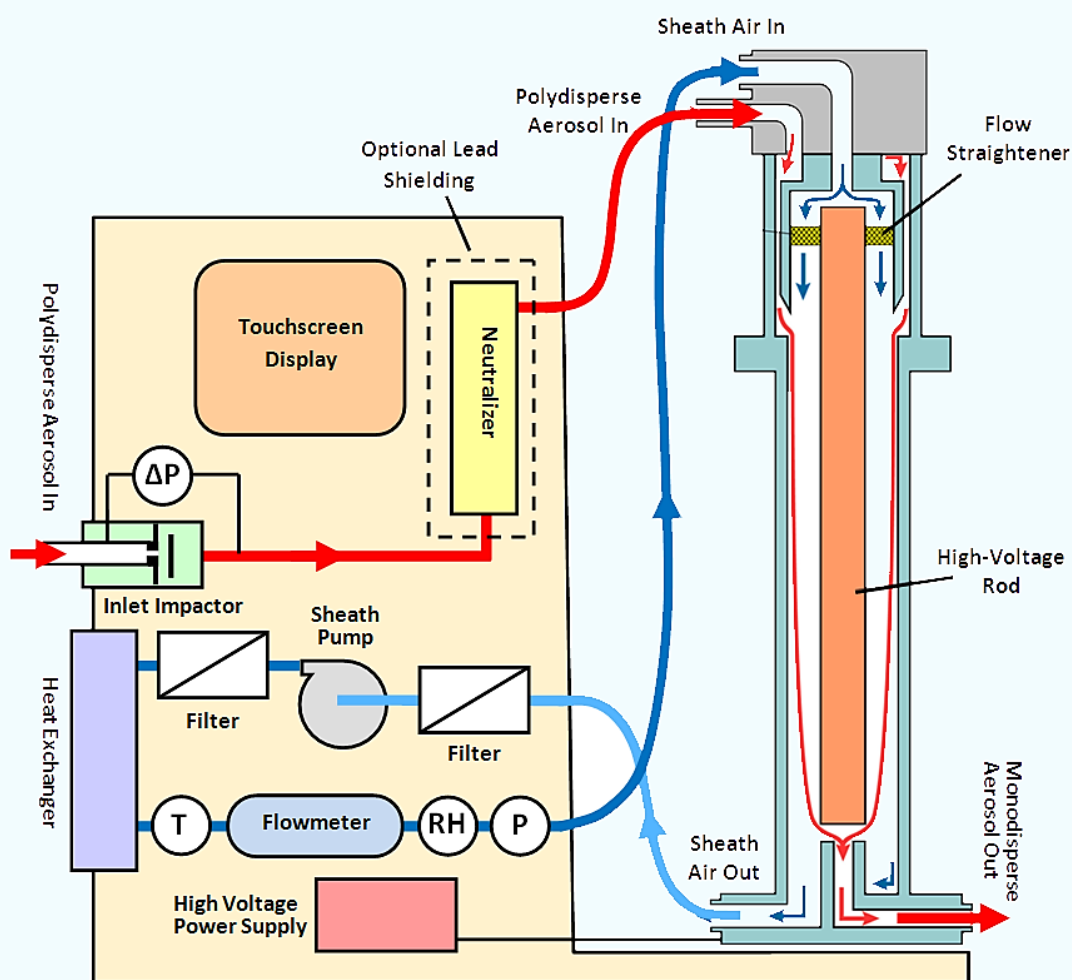
Os instrumentos são calibrados com frequência (a cada 3 ou 4 meses) com CO_2 como gás de calibração, para garantir a qualidade das medições (FRANCO, M. A. DE M., 2021). O coeficiente de espalhamento medido tem a unidade de $1/\text{Mm}$ e, durante a análise de dados, as medidas são corrigidas para erros de truncamento de acordo com os procedimentos de RIZZO et al. (2013).

4.2.4 Distribuição de tamanho do aerossol

Neste estudo, foram feitas medidas de distribuição de tamanho de partículas utilizando um SMPS (*Scanning Mobility Particle Sizer*), que consiste principalmente em um impactador para remover partículas grandes (fora da faixa de tamanho de interesse), um neutralizador para garantir cargas nas partículas, um controlador de fluxos e alta tensão, e um Analisador de Mobilidade Diferencial (DMA) que separa partículas com base em sua mobilidade elétrica. Ao usar o classificador para dimensionamento de partículas, um contador de partículas por condensação (CPC), é colocado em série com o classificador, o qual conta as partículas quando

eles saem do DMA. A Figura 12 mostra um diagrama esquemático do funcionamento do SMPS.

Figura 12 - Esquema de funcionamento do sistema SMPS da TSI. Na lateral esquerda da figura é possível ver a entrada de um fluxo polidisperso de partículas de aerossol. Após passar pelo impactador, o neutralizador induz uma distribuição de cargas conhecida, permitindo a separação de um fluxo monodisperso de partículas pelo DMA. Ao final, as partículas de aerossol do fluxo monodisperso são contadas no CPC.



Fonte: Manual TSI SMPS 3082, P/N 6006760, Revisão C. Janeiro 2016

O aerossol polidisperso passa por um neutralizador bipolar, assim as partículas recebem carga positiva, negativa ou zero. As partículas então entram no DMA e são separadas de acordo com sua mobilidade elétrica. Este parâmetro é inversamente relacionado ao tamanho da partícula e proporcional ao número de cargas nas partículas. As partículas carregadas ao ser submetidas a um campo elétrico, se movem através do gás em que estão suspensas. O número de partículas por tamanho que sai do DMA pode ser medido por um detector de

partículas externo, como um CPC. Um CPC pode apenas contar partículas e fornecer contagens precisas, mesmo em baixas concentrações.

4.2.5 Distribuição de tamanho de partículas de BC com SP2

O SP2 (*Single Particle Soot Photometer*) utiliza a alta potência ótica disponível na cavidade de um laser Nd: YAG. Partículas que absorvem radiação eletromagnética, principalmente em medidas de BC ou Carbono elementar na atmosfera, absorvem energia e são aquecidos até o ponto de incandescência. A energia emitida por esta incandescência é medida, e uma determinação quantitativa da massa de BC da partícula é realizada. Esta medição da massa é independente do estado de mistura de partículas e, portanto, o SP2 é uma medida confiável da concentração de massa de BC. Como o SP2 detecta cada partícula individualmente, também pode medir a concentração do número de BC. A Figura 13 mostra o equipamento utilizado neste estudo e localizado no sítio ATTO.

Figura 13 - Vista frontal do SP2 (*Single Particle Soot Photometer*), instrumento utilizado para obtenção da distribuição de tamanho do BC no sítio do ATTO na Amazônia.



Fonte: Manual do Operador - DOC-0171, Revisão G-9—Descreve o SP2-D

Todas as partículas espalham a luz, independentemente se absorverem luz ou não. Um detector de espalhamento é incluído no SP2, que detecta o espalhamento de partícula única em 1064 nm, e o sinal de espalhamento pode ser usado para indicar o estado de mistura do BC em cada partícula individualmente, além disso também pode ser usado para detectar o número de aerossóis e

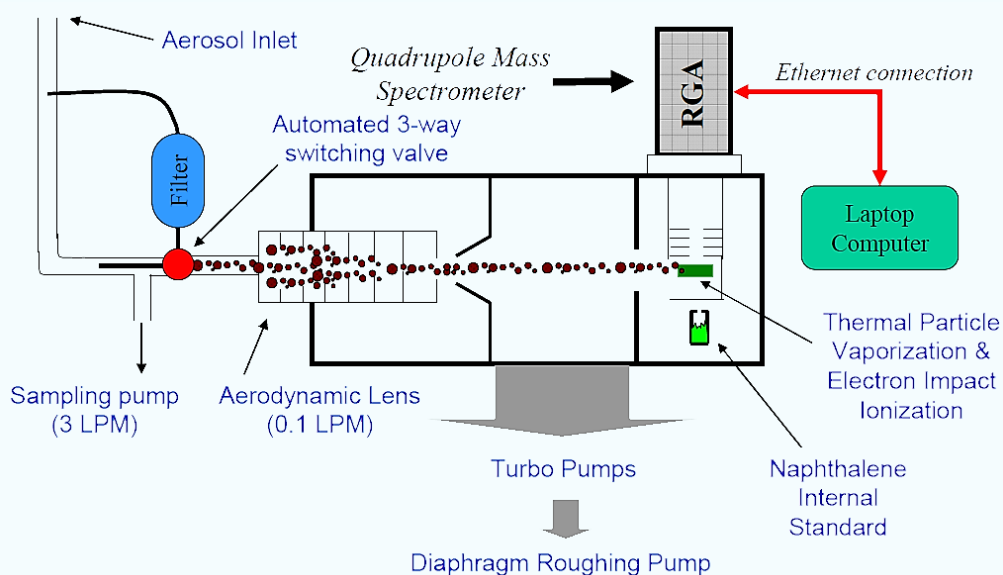
concentrações de massa que não contêm BC. Assim, o SP2 mede o espalhamento de luz e / ou incandescência de cada partícula.

Mais detalhes sobre essa técnica e aplicação em medições atmosféricas são fornecidos por Stephens e Schwarz (SCHWARZ et al., 2006; STEPHENS et al., 2003).

4.2.6 Composição química do aerossol com ACSM

Neste trabalho, a composição química do aerossol foi monitorada em tempo real através de um ACSM (monitor de especificação química de aerossol), o qual mede a concentração de massa de nitrato (NO_3^-), sulfato (SO_4^{2-}), amônio (NH_4^+), cloreto (Cl^-) e orgânicos com uma resolução temporal de cerca de 10 - 30 minutos. Uma vantagem do uso de um espectrômetro de massa desse tipo é que eles podem ser operados remotamente e continuamente, medindo aerossóis com tamanhos entre 75-650 nm (NG et al., 2011). Um esquema do ACSM é mostrado na Figura 14.

Figura 14 -Esquema de funcionamento do ACSM. As partículas do aerossol são focalizadas pelas lentes aerodinâmicas, impactadas pelo vaporizador, ionizadas por impactação de elétrons e caracterizadas quimicamente no espectrômetro de massas quadrupolo RGA. A câmera de detecção contém também uma fonte efusiva de naftaleno, utilizada para calibração e monitoramento da performance do instrumento.



Fonte: Manual de operação ACSM – Abril 2011 (NG et al., 2011)

A câmara de vácuo acopla a lente aerodinâmica de partículas com a fonte de vaporização de térmica de partículas e o espectrômetro de massa. A lente aerodinâmica cria um feixe de partículas (~ 1 mm de diâmetro) que é direcionado para a fonte de vaporização de partículas resistivamente aquecidas, tipicamente operado a 600°C. O vaporizador é montado dentro da fonte de ionização por impacto de elétrons, que ioniza qualquer material particulado vaporizado. Os íons formados são em seguida, analisados com o espectrômetro de massa quadrupolo, fornecendo informações sobre a composição.

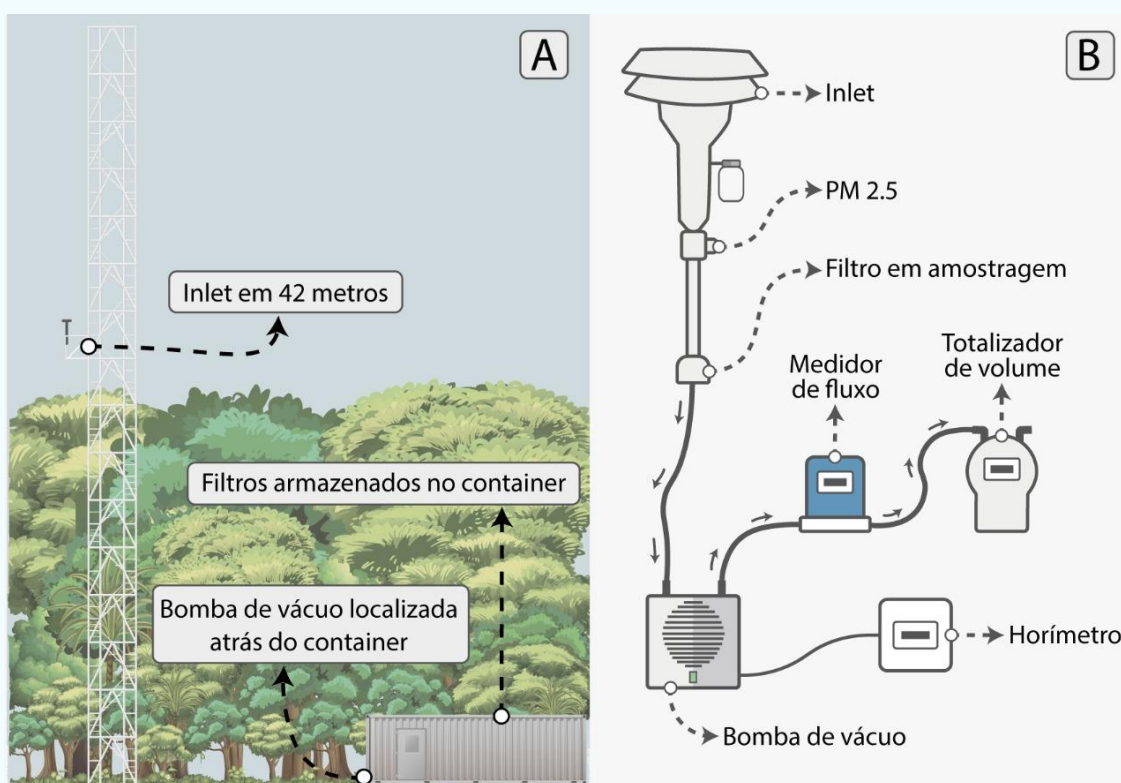
O fluxo para o ACSM através das lentes de partículas é de ~ 0,1 LPM fixada por um orifício crítico de 100 µm de diâmetro. Este fluxo bastante pequeno é sub-amostrado do fluxo do sistema de entrada de aerossol principal que é projetado para ser 3 LPM para condições de amostragem quase isocinéticas. Para obter mais informações sobre o ACSM em execução no sítio da ATTO, consulte PÖHLKER, M. L. et al. (2016).

4.2.7 Coleta de filtros Nuclepore

Para amostragem do aerossol ambiente em filtros Nuclepore (LIU; LEE, 1976), visando as análises da componente de BC e BrC através de espectrômetros óticos de alta resolução, foi utilizado um amostrador (*inlet*) com corte aerodinâmico em PM_{2.5} da *Thermo Scientific*, cujo fluxo era de 17 LPM, instalado em uma altura de 42 metros na Torre *Instant*, localizada no sítio ATTO, com as coordenadas 2°08.6470 S e 58°59.9920 W, sendo 130 metros de elevação da base. A Figura 15 mostra um diagrama do sistema de amostragem de aerossóis.

Os filtros foram armazenados em um container adjacente à torre que possui temperatura e umidade controlada (aproximadamente 27°C e 38% RH). Cada filtro é acomodado em suporte plástico com uma proteção extra em alumínio, que garante a integridade da amostra.

Figura 15 - a) Representação gráfica da amostragem dos filtros no sítio do ATTO, b) diagrama detalhado da amostragem dos filtros Nuclepore.



Fonte: Delano C. Oliveira e Fernando G. Morais

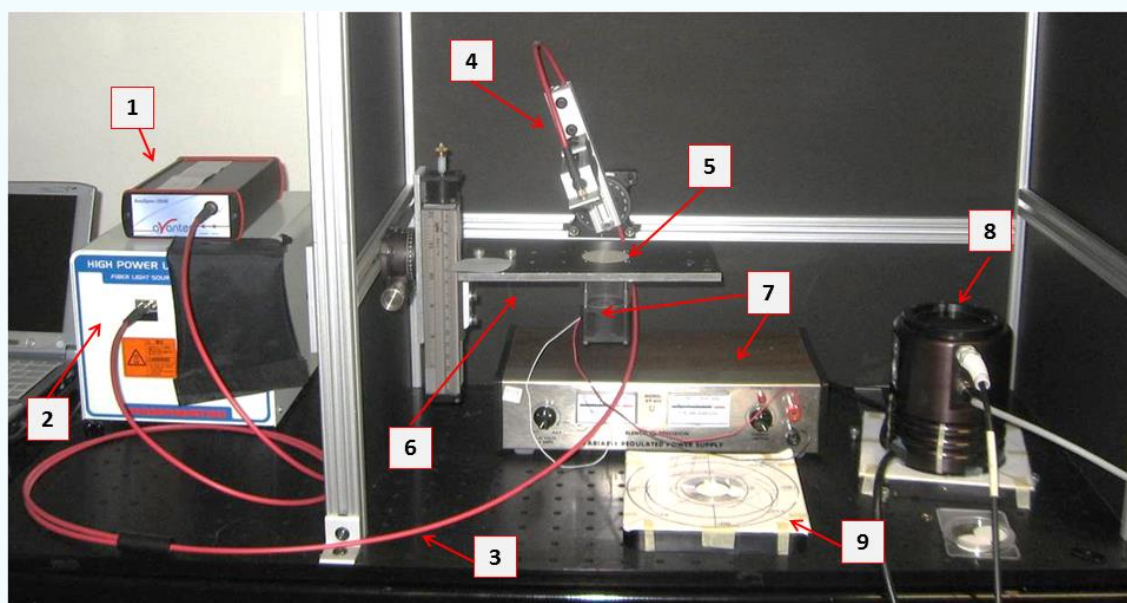
A amostragem de cada amostra foi feita ao longo de aproximadamente 7 dias, variando com as condições do tempo e massa amostrada. Desta maneira foram coletados 34 filtros entre 26 de março e 31 de outubro de 2019, onde obtivemos amostras do período seco com forte influência de queimadas, período chuvoso e período com influência de *Dust* proveniente do norte da África para a Amazônia Central.

4.3 Análises de absorção em filtros por refletômetros óticos

A absorção de luz espectral das partículas de aerossol amazônico foi investigada medindo a refletância em filtros de Nuclepore em função da massa de aerossol coletado, com a intenção de separar a componente de BC e BrC da absorção total. Uma fonte de luz de banda larga foi usada para iluminar esses filtros. A luz refletida dos filtros amostrados foi analisada comparativamente à refletividade dos filtros em branco (ROCHA-LIMA, A. et al., 2014). Dois espectrômetros com diferentes iluminadores de banda larga foram usados: um

Avantes AvaSpec 2048, com ultravioleta (UV) a partir de comprimentos de onda de 300 nm a infravermelho próximo (NIR) até 1100 nm, com uma fonte de luz UV-VIS de alta potência de Hamamatsu modelo L10290 e um FieldSpec Pro da Analytical Spectral Dispositivos com faixa de 350 a 2500 nm com refletância a partir de uma lâmpada da ASD Inc (ROCHA-LIMA, ADRIANA et al., 2018). A configuração experimental usada para medir a refletância pode ser observada na Figura 16.

Figura 16 - Configuração experimental usada para medições de refletância ótica: Os componentes do espectrômetro Avantes são apresentados como: (1) espectrômetro, (2) lâmpada, (3) fibra ótica bifurcada, (4) fibra ótica apontando o filtro, (5) superfície porosa e posição do filtro, (6) mesa ajustável e (7) fonte de alimentação e ventilador. Os componentes do espectrômetro ASD são: (8) cabeça do refletômetro e (9) superfície de PTFE para colocar o filtro. A eletrônica do espectrômetro ASD não é mostrada nesta imagem.



Fonte: Adriana Rocha Lima

No sistema Avantes, uma fibra ótica bifurcada é usada para simultaneamente iluminar e detectar de volta a luz refletida pelos filtros. Durante a medição, o filtro é colocado no topo de uma membrana altamente reflexiva que está apoiada no topo de uma superfície metálica porosa conectada a um exaustor e fonte de alimentação. O exaustor é mantido girando a uma velocidade baixa para produzir uma pequena diferença de pressão abaixo do filtro, garantindo que o filtro está perfeitamente plano durante as medições. Medidas angulares podem ser realizado inclinando a mesa ajustável mantendo o filtro fixo ou inclinando a fibra com o iluminador e detector. No sistema ASD, os filtros são colocados na superfície

de um painel espectral lambertiano de PTFE (politetrafluoroetileno), o que significa que superfície tem a mesma radiância ($W/sr.m^2$) quando vista de qualquer ângulo, além de um anel metálico que é usado para garantir que o filtro fique esticado.

Devido ao fato que os filtros Nuclepore e o painel espectral são superfícies altamente reflexivas e a refletância é normalizada por um filtro limpo, assumimos que o total a atenuação da luz deve-se à absorção das partículas do aerossol. Os efeitos de múltiplos espalhamentos são minimizados nos filtros Nuclepore devido ao fato de que as partículas coletadas permanecem na superfície dos filtros (MARTINS et al., 2009). Uma completa validação do método de obtenção de refletância ótica em filtros Nuclepore foi feita por REID et al. (1998).

Além das medidas de absorção de luz espectral (300-2500 nm) das partículas, separando-as em BC e BrC, um terceiro refletômetro ótico foi utilizado, visando medir somente a contribuição de BC nestes mesmos 34 filtros amostrados na Amazônia de forma simples e rápida. Para isso foi utilizado um M43D *Smokestain Reflectometer Diffusion Systems* observado na Figura 17.

Figura 17 Refletômetro M43D *Smokestain* da *Diffusion Systems* do Laboratório de Física atmosférica do Instituto de Física da USP. Consiste basicamente em uma fonte de luz, que é um LED de alto desempenho com emissão máxima a 650 nm, e uma célula fotovoltaica que mede refletância emitida pelo filtro.



Fonte: Foto de Fernando G. Morais

O refletômetro consiste basicamente em uma fonte de luz, que é um LED de alto desempenho com emissão máxima a 650 nm, e um medidor (SAFO-ADU et al., 2014).

A luz emitida atinge a superfície cuja refletância queremos medir, sendo então refletida e medida por uma célula fotovoltaica. Desde que finas camadas de partículas de aerossol sejam coletadas no filtro (uma única camada), há uma relação simples entre a concentração de BC coletado no filtro e a refletância obtida que pode ser obtida através da lei de Lambert-Beer.

A relação entre BC e a refletância medida nos filtros foi obtida empiricamente pelo laboratório de Física Atmosférica do Instituto de Física da USP como:

$$BC = [(88.3 - (77.5 * \log R)) + (16.7 * (\log R)^2)] * \frac{A}{V} \quad 4.4$$

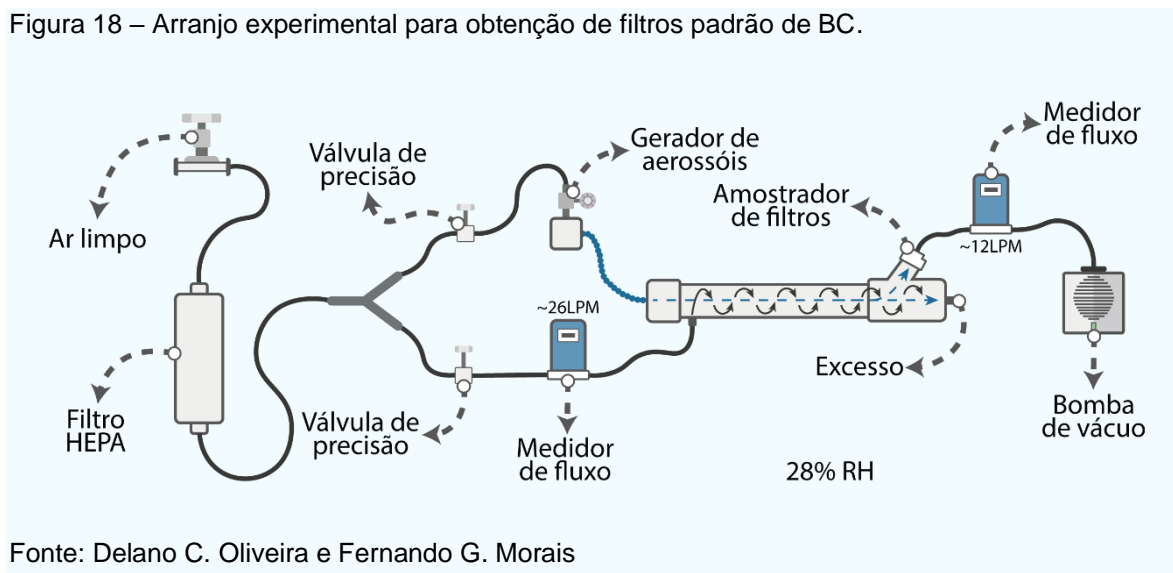
onde R é a refletância medida no refletômetro *Smokestain*, A é a área em cm² do filtro e V é o volume amostrado em m³ para a massa de BC em µg/m³

4.3.1 Amostragem e elaboração de filtros com BC padrão

As medidas realizadas nos refletômetros óticos de alta resolução em W/cm².nm.sr nos forneceram valores que variavam entre 0 e 1 ao ser normalizada, sendo zero a refletância mínima e um a máxima. Com o intuito de obtermos absorção a partir da calibração de dados de refletância utilizamos um conjunto de 23 filtros de Nuclepore produzidos na Universidade de São Paulo (USP), usando BC padrão *Monarch 71* fabricadas pela Cabot Corporation (HITZENBERGER et al., 1996), de acordo com MARTINS et al. (2009).

Além dos 23 filtros previamente analisados, geramos mais 10 filtros amostrados com *Monarch 71*, visando baixos *loadings* de partículas para uma melhor compreensão da curva da curva de calibração desenvolvida por MARTINS et al., 2009. A Figura 18 mostra o arranjo experimental para a obtenção desses filtros.

Figura 18 – Arranjo experimental para obtenção de filtros padrão de BC.



Fonte: Delano C. Oliveira e Fernando G. Morais

A distribuição do tamanho do volume do *Monarch 71* partículas atinge um pico de 0,5 μm de diâmetro, que é ligeiramente maior do que o pico de poluição urbana ou queima de biomassa partículas de aproximadamente 0,3 a 0,4 μm (MARTINS et al., 2009).

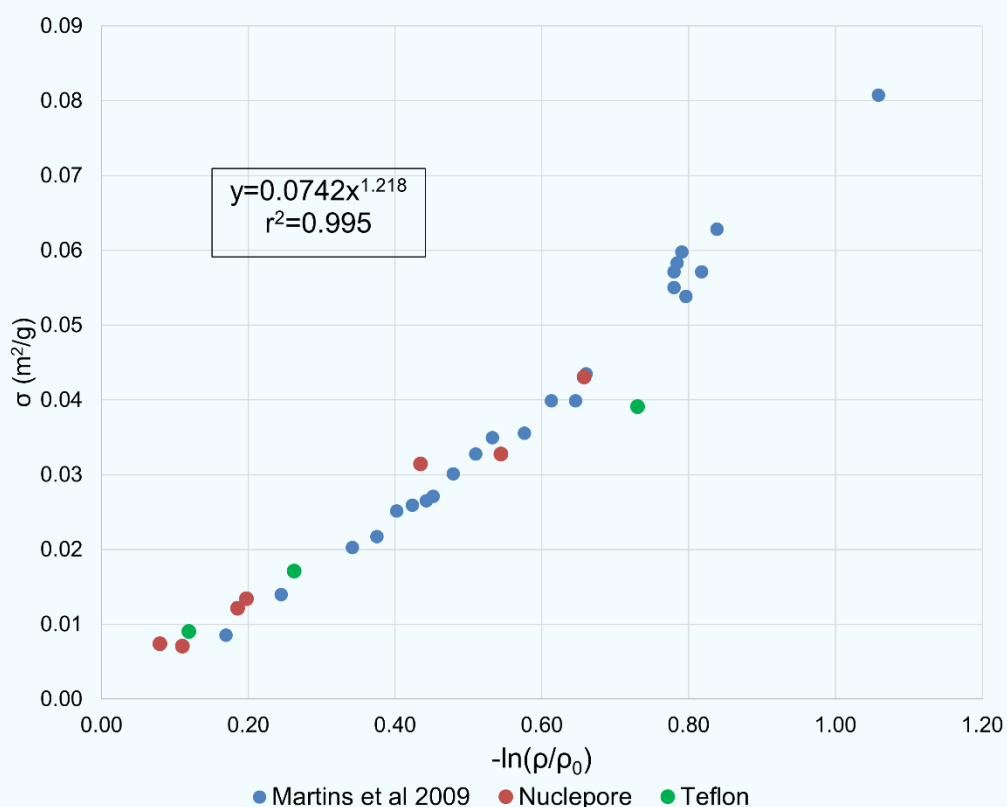
A Figura 19 mostra um gráfico para a densidade de massa medida de cada filtro de calibração (em unidades de m^2/g) em função do logaritmo natural do filtro refletância, normalizada pela refletância de um filtro em branco.

Como as partículas são coletadas diretamente na superfície dos filtros Nuclepore, efeitos do espalhamento múltiplo entre a camada de aerossol e a superfície são minimizados, e foram basicamente negligenciados no desenvolvimento deste modelo simplificado.

Para os filtros de Teflon esse efeito é bastante significativo conforme Figura 19, desta forma para o desenvolvimento deste estudo utilizamos apenas filtros de Nuclepore e sugerimos para trabalhos futuros uma melhor caracterização dos filtros de Teflon utilizando uma quantidade maior de filtros com diferentes cargas de BC Padrão.

Conforme mostrado na Figura 19 e confirmado por cálculos de transferência radiativa com DISORT (STAMNES et al., 1988) a lei de Lambert-Beer é uma boa aproximação para filtros com baixa carga de aerossol, representado aqui por valores de $\ln(p/p_0)$ menores que 0.25.

Figura 19 - Relação entre a densidade de massa das amostras padrão de BC versus a razão do logaritmo natural de refletância $\ln(\rho/\rho_0)$ normalizado por filtros limpos e não amostrados para os 23 filtros Nuclepore amostrados por Martins et al 2009, além de 7 filtros Nuclepore e 3 filtros de Teflon amostrados pelo autor da tese com diferentes massas.



Fonte: Martins et al 2009 atualizada por Fernando G. Morais

Para os casos de alto *loading*, o sombreamento entre partículas vizinhas e outros efeitos produzem desvios não contabilizados pela lei de Lambert-Beer. De modo a compensar esses desvios, uma escala empírica com um coeficiente (b) é ajustado aos pontos dos dados, produzindo uma correção na lei Lambert-Beer, por uma lei de potência. Essas correções foram aplicadas às medições de refletância para este estudo através da equação:

$$\sigma = -\frac{G}{2\alpha_a} \left[\ln\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right) \right]^b \quad 4.5$$

onde (σ) é a densidade de massa total da coluna, (α_a) a eficiência de absorção de massa, (G) é um fator geométrico que depende da iluminação efetiva, $\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)$ é a razão da refletância dos filtros amostrados pela refletância de um filtro limpo e não

amostrado e (b) é uma correção na lei de Lambert-Beer para filtros com alto *loading* a partir de uma lei de potência ajustada sobre os dados obtidos.

Para este estudo assumimos $G = 1$ para esta geometria em particular, com $\alpha_a = 6,7 \text{ m}^2/\text{g}$. Este resultado é consistente com os resultados publicados anteriormente para partículas de *Monarch 71* (CLARKE et al., 1967; HITZENBERGER et al., 1996).

4.4 Análises de filtros por fluorescência de raios X

A espectrometria de fluorescência de raios X por energia dispersiva (EDXRF) é um método analítico que se baseia na emissão de raios X de alta energia para identificar e quantificar a concentração de elementos químicos presentes nas amostras contendo partículas de aerossóis. Ao irradiar com raio X uma amostra contendo aerossóis, elétrons das camadas internas dos átomos são excitados. Quando estes retornam às camadas originais, ocorre a emissão secundária de raios X, cujas energias são características individuais de cada átomo (VAN GRIEKEN; MARKOWICZ, 2001; VAN MEEL et al., 2010).

Neste trabalho, para caracterizarmos a composição química elementar de cada um dos 34 filtros amostrados, utilizamos o espectrômetro de fluorescência de raios X Epsilon 5 PANalytical B.V do laboratório de física atmosférica do Instituto de Física da USP, o qual possui geometria polarizada tridimensional, com 11 alvos secundários (Mg, Al, Si, Ti, Fe, Ge, Zr, Mo, Ag, CaF_2 , CeO_2) e com tempo de medida das condições para os elementos leves (Na a K) de 600 s e para os elementos pesados (Ca a Pb) de 300s, ou seja, o tempo final de medida para cada amostra é de aproximadamente 1 hora (ARANA, ANDRÉA et al., 2014). Uma figura do espectrômetro de fluorescência de raios X Epsilon 5 PANalytical B.V pode ser vista na Figura 20.

As emissões de raios X são medidas pelo detector de Germânio (PAN-32 Ge), ajustado para a detecção da energia dispersiva. Os raios X quando passam pelo detector produzem pulsos de corrente elétrica, os quais são medidos e contados. Esses sinais são processados e apresentados na forma de um espectro (cps/mA versus keV), contagens e energia, respectivamente. Assim, o software determina a energia e intensidade dos picos de raios X característicos, em seguida, calcula as concentrações elementares através da comparação com os parâmetros

das curvas de calibração. Com base nos espectros de raios X medidos pelo detector, pode-se identificar e quantificar a concentração dos elementos químicos presentes na amostra (ARANA, ANDRÉA et al., 2014)

Figura 20 – Espectrômetro de fluorescência de raios X Epsilon 5 PANalytical B.V do laboratório de física atmosférica do Instituto de Física da USP.



Fonte: Foto de Fernando G. Morais

Utilizamos também, no presente trabalho, as medidas obtidas pela FRX para calcular a massa de *Dust* (MAENHAUT et al., 2005) presente na amostra de acordo com a equação:

$$Dust = 1.16 * (1.90Al + 2.15Si + 1.41Ca + 1.67Ti + 2.09Fe) \quad 4.6$$

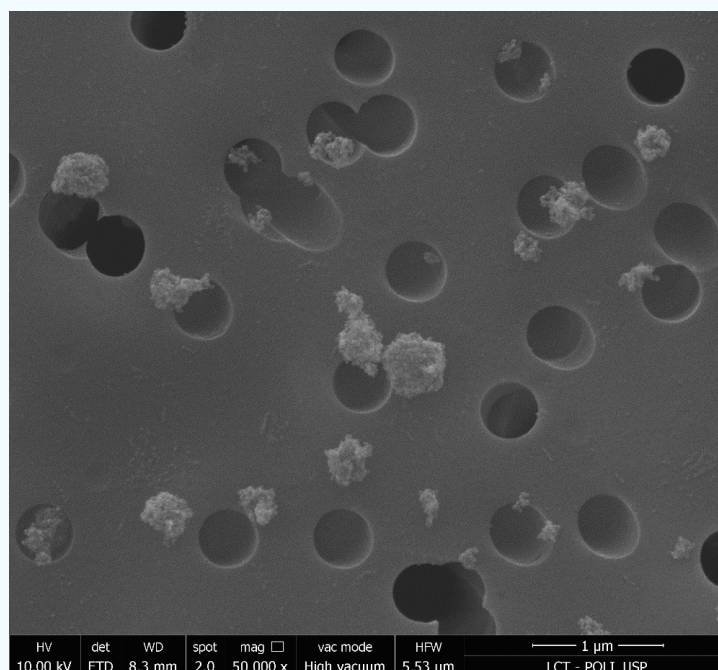
onde o fator 1.16 é para compensar a ausência de MgO, Na₂O, K₂O e H₂O para o cálculo da massa de *Dust* (CHAN et al., 1997).

4.5 Microscopia eletrônica de varredura e análises EDS

As análises de microscopia eletrônica foram realizadas no Laboratório de Caracterização Tecnológica (<https://lct.poli.usp.br/>) da Escola Politécnica na

Universidade de São Paulo (USP). A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi realizada em 8 dos 34 filtros amostrados, sendo escolhidos filtros do período de seco, chuvoso e período com influência de *Dust* africano na Amazônia (PÖHLKER, C. et al., 2019), além disso analisamos dois filtros Nuclepore amostrados com BC padrão *Monarch* 71 (MARTINS et al., 1998) para analisar o formato do BC que foi utilizado na realização das curvas de calibração, Figura 21.

Figura 21 – MEV de filtro Nuclepore amostrado com padrão de BC do tipo *Monarch* 71, onde pode-se observar o formato e o tamanho médio das partículas de BC.



Fonte: Fernando G. Morais

As amostras de superfície foram fixadas em blocos de alumínio com fita dupla-face de carbono. As amostras de seção transversal foram cortadas por aço cirúrgico lâmina e foram fixados diretamente entre dois alumínios placas com fita dupla-face de carbono. As amostras foram revestidas com filme de platina de 15 nm de espessura (Bal-tec MED020 Sistema de revestimento de alto vácuo). Imagens foram tiradas usando elétrons retro espalhados usando um Quanta FEG 650 (Thermo Fisher) em modo de alto vácuo operado a 10 kV.

O Microscópio Eletrônico de Varredura Quanta FEG produz imagens ampliadas de uma variedade de espécimes, alcançando ampliações de mais de 100.000 × fornecendo imagens de alta resolução em formato digital. Esta ferramenta analítica importante e amplamente utilizada oferece um campo de visão

excepcional, preparação mínima de amostra e a capacidade de combinar a técnica de medida com espectroscopia de raios X por dispersão em energia (EDS), que é uma técnica analítica usada para a análise elementar ou caracterização química de uma amostra.

4.6 Estimativa do *Brown Carbon*

Para obter a contribuição do *Brown Carbon* (BrC) através das medidas de absorção, aplicamos a abordagem desenvolvida por WANG, XUAN et al. (2016) e aplicada na Amazônia por SATURNO et al. (2018) que considera o coeficiente de absorção total ($\sigma_{abs,470\text{ nm}}$) medido pelo Aetalômetro em 470 nm ou fotômetro em 440nm como uma soma das contribuições do BC ($BC \sigma_{abs,470\text{ nm}}$) e BrC ($BrC \sigma_{abs,470\text{ nm}}$), conforme a equação:

$$\sigma_{abs,470\text{ nm}} = BC \sigma_{abs,470\text{ nm}} + BrC \sigma_{abs,470\text{ nm}} \quad 4.7$$

A metodologia consiste em primeiro obter a contribuição da absorção do BC para o coeficiente de absorção total e, em seguida, recuperar a contribuição do BrC. Consideramos que a dependência do comprimento de onda da componente de absorção do BC varia com o tamanho da partícula, o que implica que o expoente Ångström de absorção do BC (AAE) pode assumir valores diferentes de 1, conforme demonstrado anteriormente no gráfico da Figura 5. Esta dependência do comprimento de onda é calculada considerando três comprimentos de onda selecionados que maximizam a cobertura dos espectros de luz do ultravioleta (470 nm ou 440nm), em que a componente BrC é mais significativa, o comprimento de onda vermelho visível (660 nm) e o infravermelho próximo (880 nm), onde o BC desempenha um papel importante, pois é muito significativo dominando a absorção.

Em seguida, é definida a dependência do comprimento de onda do expoente Ångström de absorção (WDA) da seguinte forma:

$$WDA = AAE_{470-880\text{ nm}} - AAE_{660-880\text{ nm}} \quad 4.8$$

onde $AAE_{\lambda_1-\lambda_2}$ é calculado como:

$$AAE_{\lambda_1-\lambda_2} = \frac{-\ln\left(\frac{\sigma_{abs}(\lambda_1)}{\sigma_{abs}(\lambda_2)}\right)}{\ln\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)} \quad 4.9$$

Valores teóricos para BC WDA, com base na Teoria de Mie, estimados através de $AAE_{470-880 \text{ nm}}$ e $AAE_{660-880 \text{ nm}}$, foram obtidos considerando partículas polidispersas de BC revestido com distribuições de tamanhos diferentes, compostas por um núcleo BC monodisperso misturado internamente de índice de refração de 1,95 - 0,76i (BOND, TAMI C.; BERGSTROM, 2006), um revestimento com índice de refração de 1,55 - 0,001i e densidade BC de 1,8 g cm⁻³ (SCHKOLNIK et al., 2007).

Para calcular a contribuição de absorção apenas devido ao BC, isolamos o termo $AAE_{660-880 \text{ nm}}$ na equação (4.8) e aplicando (4.9) obtemos:

$$BC \ AAE_{470-880 \text{ nm}} = WDA + AAE_{660-880 \text{ nm}} \quad 4.10$$

$$BC \ \sigma_{abs,470 \text{ nm}} = \sigma_{abs,880 \text{ nm}} \times \left(\frac{470}{880}\right)^{-BC \ AAE_{470-880 \text{ nm}}} \quad 4.11$$

Portanto, aplicando (4.9) em (4.6), derivamos a contribuição do BrC para a absorção de luz (BrC $AAE_{470-880 \text{ nm}}$):

$$BrC \ \sigma_{abs,470 \text{ nm}} = \sigma_{abs,470 \text{ nm}} - BC \ \sigma_{abs,470 \text{ nm}} \quad 4.12$$

Neste método, assumimos que a contribuição de absorção de BrC é desprezível em 660 e 880 nm. Isso é apoiado por as medições de laboratório (CHEN; BOND, 2010; KIRCHSTETTER et al., 2004; YANG et al., 2009; ZHANG, X. et al., 2013). No entanto, Alexander et al. (2008) descobriram que a absorção de BrC pode ser significativo em 680 nm, examinando uma perda de energia no espectro de elétrons utilizando um microscópio eletrônico de transmissão (ALEXANDER et al., 2008). Se o BrC absorve significativamente a 680 nm, nossa estimativa de absorção de BrC em 440 nm seria subestimada. As incertezas da metodologia seguem a abordagem de Wang, discutida em detalhes em WANG, XUAN et al. (2016).

4.7 Obtenção das matrizes de Ångström

O método de classificação dos aerossóis pela matriz de Ångström (CAPPA et al., 2016; CAZORLA et al., 2013; RUSSELL et al., 2010) utiliza os valores de AAE como indicadores da composição química do aerossol e SAE como indicação da distribuição de tamanho do particulado (PALÁCIOS, 2017). Neste trabalho, aplicamos uma metodologia baseada em um estudo de (BAHADUR et al., 2012), dividindo o espaço AAE vs. SAE (a chamada matriz Ångström), em diferentes regiões que estão associadas a diversos tipos de aerossóis absorvedores. Uma das principais vantagens desta classificação é a separação das espécies absorvedoras dos aerossóis, *Dust* e partículas grossas e biogênicas. A análise de incertezas com esta técnica é muito complexa, e a análise deve ser interpretada como uma análise qualitativa.

4.8 Estimativa da forçante radiativa direta de aerossóis carbonáceos

A estimativa do efeito radiativo dos aerossóis neste trabalho foi obtida através de dados de absorção e espalhamento de aerossóis *in situ* e a função de fase dos aerossóis por sensoriamento remoto (AERONET). Os cálculos para obter a irradiância difusa no topo da atmosfera foi realizado através do software libRadtran (MAYER; KYLLING, 2005).

O libRadtran é uma biblioteca de rotinas e programas de transferência radiativa. O programa central do pacote libRadtran é a ferramenta de transferência radiativa *uvspec*. O *uvspec* foi originalmente projetado para calcular a irradiância espectral e o fluxo com propriedades de radiação solar, que pode levar à produção de efeitos fotoquímicos e fotobiológicos nas partes ultravioleta e visível do espectro (KYLLING, 1992), de onde vem o nome. Ao longo dos anos, o *uvspec* passou por inúmeras ampliações e melhorias. O *uvspec* agora inclui a energia solar e espectro térmico, atualmente de 120 nm a 100 μm .

O programa foi projetado como uma ferramenta versátil, oferecendo uma variedade de opções para configurar e modificar a atmosfera com moléculas, partículas de aerossol, água e nuvens de gelo, sendo a superfície como limite inferior.

O libRadtran também fornece utilitários relacionados, como, por exemplo, um programa Mie (mie), alguns utilitários para o cálculo da posição do Sol (Zenith, noon, sza2time), algumas ferramentas para interpolação, convolução e integração (spline, conv, integr) e várias outras pequenas ferramentas para ir configurando a entrada *uvspec* e pós-processando na saída *uvspec*.

Mais informações gerais sobre o libRadtran, incluindo exemplos de uso, podem ser encontradas nas publicações de referência (MAYER; KYLLING, 2005) e no guia do usuário disponível em <http://libradtran.org/doc/libRadtran.pdf>.

Neste trabalho, o cálculo da irradiância difusa no topo da atmosfera foi realizado no libRadtran utilizando o comando **aerosol_file explicit**, no qual é especificado explicitamente as propriedades óticas das camadas atmosféricas, ou seja, pelo coeficiente de extinção, albedo de espalhamento simples e os momentos da função de fase, tudo em função do comprimento de onda. Isto é compilado dentro de uma função do libRadtran, na qual definem-se os parâmetros para cada altitude.

Utilizamos ainda como entrada o arquivo de atmosfera **afglt.dat**, que é referente a latitudes tropicais (ANDERSON et al., 1986), e o arquivo solar **kurudz_full.dat** (GASTEIGER et al., 2014). Para obtermos a forçante radiativa, utilizamos ainda como referência o topo da atmosfera (TOA), ângulo solar zenital (SZA) 0° e albedo de superfície no comprimento de onda do visível para florestas (KAUFMAN; NAKAJIMA, 1993; LEITÃO et al., 2002).

A Forçante radiativa direta de aerossóis neste trabalho foi calculada em relação a um filtro específico amostrado durante a estação chuvosa, a saber, o filtro 6. Este filtro foi escolhido pois foi amostrado num período considerado limpo e relativamente pristino, com os menores coeficientes de absorção e espalhamento de aerossóis e evitando picos monitorados de transporte de *Dust*. A escolha do filtro 6 se mostrou bastante razoável ao observar os resultados obtidos, além disso, se tratou de uma medida real, não obtida por modelos climáticos.

4.9 Análise multivariada de *clusters*

A análise de *cluster* é uma técnica de análise multivariada bastante utilizada para interpretação de dados analíticos. O objetivo principal da Análise de *Cluster* é

identificar grupos de objetos com propriedades semelhantes dentro de um grande conjunto de dados (JOHNSON et al., 2014). Esta técnica de agrupamento surgiu exatamente da necessidade de se obter informações seguras estatisticamente de uma série de dados, os quais seriam muito extensos para serem analisados um a um (CASTANHO, 1999).

Partindo-se do espaço de N dimensões (por exemplo, variáveis ou amostras), são calculadas as distâncias entre todos os pontos (objetos) deste espaço. A partir daí agrupam-se os objetos com distâncias menores. Sobre estes grupos são calculadas novamente distâncias entre eles e formado um segundo nível de agrupamento, e assim sucessivamente. Dessa forma vão se criando níveis, até que se tenha um último nível agrupando todos os elementos. Esta estrutura é representada na forma de dendrograma, o que promove uma fácil interpretação dos resultados (CASTANHO, 1999). O método de agrupamento utilizado foi o método *Ward*, que é considerada uma das melhores estratégias para agrupamento hierárquico (GERAB, 1996).

Antes destas análises serem feitas, deve-se preparar a base de dados, realizando um escalonamento da matriz de dados, para facilitar a interpretação destes. Tem-se então a matriz que será utilizada nas análises de *clusters*. A medida entre dois pontos pode ser feita em distância Euclidiana quadrática dada pela equação:

$$d_{ij}^2 = \sum_{k=1}^n (z_{ik} - z_{jk})^2 \quad 4.13$$

Este tipo de medida é geralmente utilizado quando as variáveis são independentes entre si.

Utilizando-se esta técnica por variável, cada *cluster* formado agrupa variáveis que possuem distância geométrica próxima, no espaço das variáveis. Cada *cluster* identifica a composição elementar, caracterizando qualitativamente uma fonte ou um processo de emissão de poluente.

Neste trabalho, todas as análises de clusters foram realizadas com o auxílio do programa IBM SPSS *Statistics* versão 26.0.

4.10 Análise multivariada de fatores principais

A análise de fatores por componentes principais (PCA) é um método de análise multivariada que foi desenvolvido por psicólogos para extrair o fator mental de inteligência a partir dos resultados de testes de QI. Posteriormente, foi empregado em áreas de geologia, economia e na determinação da estrutura de fontes de aerossóis atmosféricos (ARTAXO NETTO, 1985; BURGER, 2018; SANTOS JUNIOR, 2015).

A partir da variabilidade temporal das concentrações elementares, a PCA reduz o número de variáveis necessárias para explicar as concentrações medidas. As novas variáveis, ortogonais entre si, serão combinações lineares das variáveis originais e são escolhidas de modo a representar o máximo possível da inicial das medidas. Espécies que possuam variabilidade temporal semelhante são consideradas de uma mesma fonte, transporte ou processo de formação (SANTOS JUNIOR, 2015).

Nessa análise, não é necessária nenhuma premissa sobre o número de fontes ou a composição das mesmas (ARANA, A., 2014; ARTAXO NETTO, 1985). A PCA foi aplicada ao estudo de aerossóis pela primeira vez por grupos das universidades de Illinois, EUA (HOPKE et al., 1976) e, a partir de então, tem sido empregada sistematicamente no estudo da composição de aerossóis urbanos e remotos, mostrando-se uma análise eficiente na quantificação de fontes de material particulado (ANDRADE et al., 2012).

Assume-se que a concentração observada para cada variável é a combinação linear da contribuição de cada um dos fatores principais. O número de fatores principais é determinado empregando-se uma análise de autovetores e autovalores, técnica que tenta simplificar a descrição de um sistema determinando o número mínimo de novas variáveis necessárias para reproduzi-lo.

O primeiro passo na análise de autovetores e autovalores é calcular uma matriz de dispersão, que mede o grau de relação entre as variáveis. Para melhor interpretação dos fatores principais, efetua-se uma rotação dos autovetores, preservando sua ortogonalidade, mas maximizando a variância dos quadrados para cada fator, de modo que estes assumam valores mais próximos de um. O

método utilizado neste trabalho, chamado estrutura simples ou VARIMAX (ANDRADE, 1993), baseia-se na maximização da função (CASTANHO, 1999):

$$V = \frac{1}{p} \sum_{j=1}^m \left[\sum_{i=1}^p l_{ij}^4 - \frac{1}{p} \left(\sum_{i=1}^p l_{ij}^2 \right)^2 \right] \quad 4.14$$

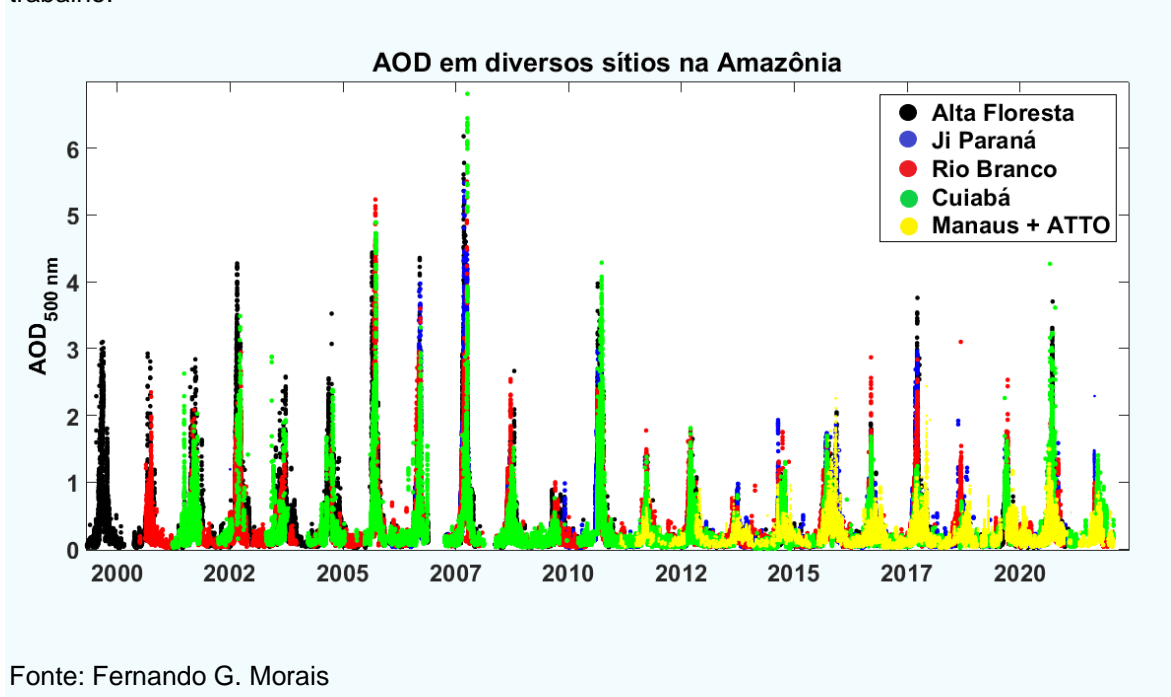
onde V é a matriz de rotação VARIMAX; l são os autovetores e p é o número de fatores principais retidos. Mais detalhes podem ser obtidos na literatura em JOHNSON et al. (2014).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Resultados relativos ao sensoriamento remoto de aerossóis

Os fotômetros da rede AERONET possuem uma série de dados bastante consistente, conforme podemos observar no gráfico da Figura 22, o qual mostra toda a série temporal dos últimos 23 anos (1999 a 2022) de medidas dos fotômetros de Alta Floresta, Cuiabá, Ji-Paraná, Rio Branco e Manaus, considerando nível 1.5, que é a qualificação dos dados de acordo com os algoritmos utilizados pela NASA na rede AERONET, que variam entre 1.0, 1.5 e 2.0 na versão 3 do algoritmo de redução de dados (GILES et al., 2019).

Figura 22 - Série temporal de 1999 a 2022 das medidas de profundidade ótica de aerossol (AOD) para o comprimento de onda de 500nm nos sítios de pesquisa onde foi caracterizado o BrC neste trabalho.



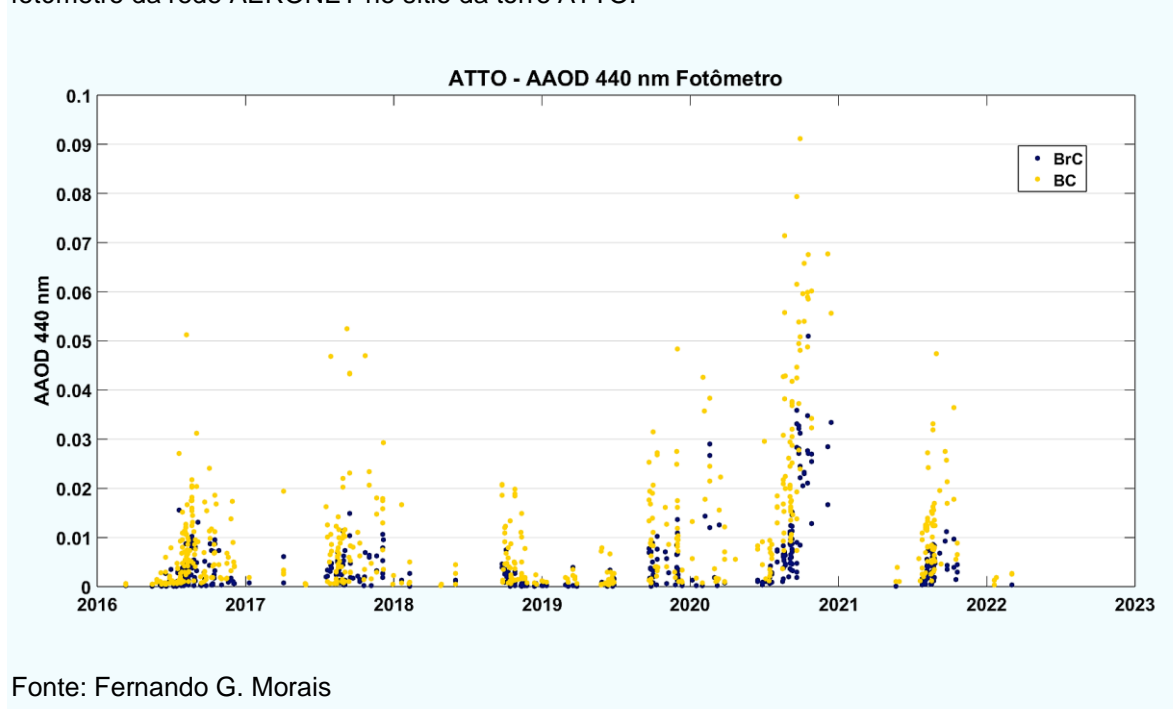
Fonte: Fernando G. Morais

A série temporal de AOD em 500 nm (Figura 22) mostra também a forte sazonalidade do aerossol amazônico. Na estação chuvosa, valores extremamente baixos de AOD são apresentados (cerca de 0.1 em 500 nm) com um forte aumento da concentração de aerossóis na coluna atmosférica durante os períodos de seca e consequentes queimadas de biomassa na região (1 a 6.5 em 500 nm). Vemos uma forte variabilidade ano a ano, que é associada com diferentes valores de precipitação e com a meteorologia de larga escala. Vemos também alta

variabilidade entre os diferentes sítios experimentais. Em geral, o AOD é mais baixo nos sítios de Manaus do que nas localidades próximas ao arco do desmatamento.

A absorção de radiação pelos aerossóis pode ser quantificada pelo AAOD, e a maior contribuição do BrC ocorre para comprimentos de onda próximos ao ultravioleta (LACK; LANGRIDGE, 2013). A Figura 23 ilustra a série temporal para o sítio ATTO, principal sítio experimental deste estudo, pois foi onde obtivemos medidas em paralelo de diversos instrumentos, a saber, medidas de absorção, espalhamento, composição química de aerossóis, distribuição de tamanho e coleta de filtros Nuclepore. É importante salientar que existem muitas lacunas nos dados no período de chuvas na Amazônia, pois o fotômetro solar não funciona em dias nublados e com chuva, o que representa uma séria limitação deste tipo de medição. Assim, a maior parte dos dados é para a estação seca, que dura em média de agosto a novembro, e podemos observar a contribuição de BC e BrC para o AAOD total em 440nm. Os valores em geral são menores que 0.02, mas chegaram a 0.08 na estação de queimadas de 2020.

Figura 23 - Série temporal da fração de BrC e BC do AAOD em 440nm, a partir de dados de fotômetro da rede AERONET no sítio da torre ATTO.



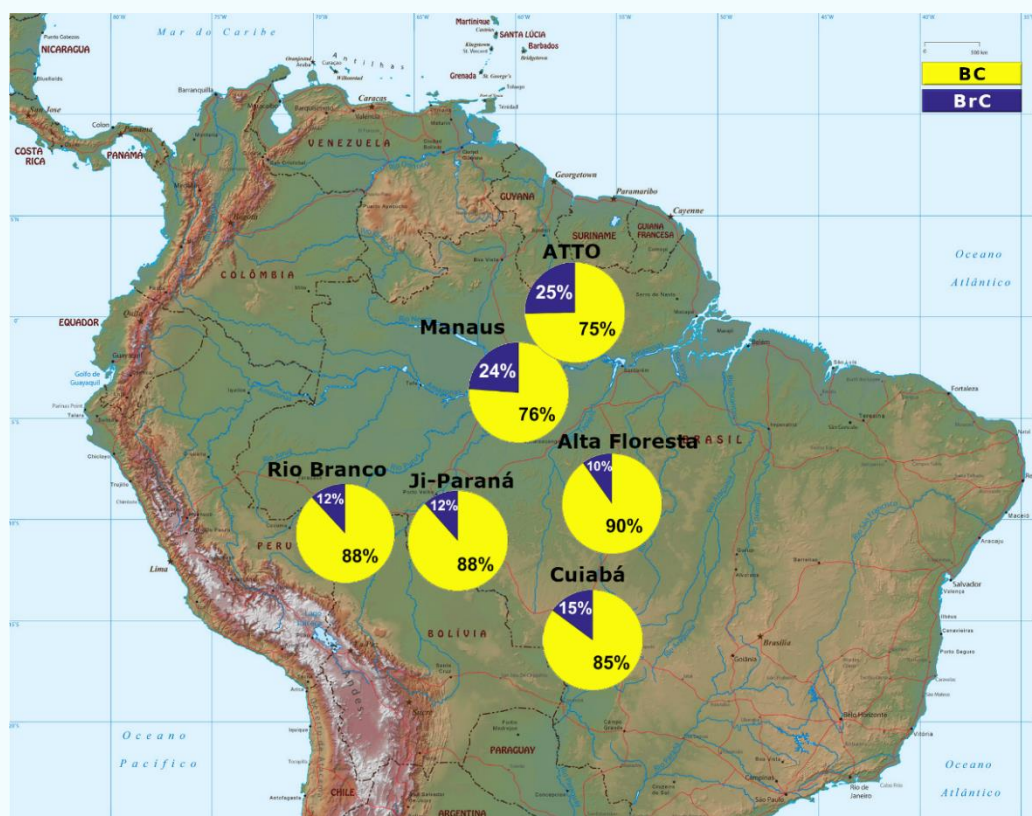
Fonte: Fernando G. Morais

A contribuição do BrC e BC para o AAOD foi calculada aplicando o algoritmo de Wang aos dados de AAOD nível 1.5 em 440 nm, 675 nm e 870 nm. Reportamos

o resultado de BrC para o comprimento de onda de 440nm pois é onde se espera a maior contribuição.

Podemos observar um comportamento consistente e similar para os sítios localizados no arco do desmatamento e distantes entre si. A Figura 24 apresenta a importância relativa de BrC e BC na absorção para todos os sítios analisados neste trabalho, sendo amarelo a porcentagem de BC e azul a porcentagem de BrC. Podemos observar uma distinção entre os sítios do arco do desmatamento (Alta Floresta, Ji-Paraná, Rio Branco, Cuiabá) e os sítios prístinos (Manaus e ATTO), onde cada grupo apresenta comportamentos similares. Esse contraste na relação BrC/BC pode ser explicado pelo diferente envelhecimento das plumas de queima de biomassa (PONCZEK et al., 2022) impactando cada um dos sítios. As análises na torre ATTO e Manaus EMBRAPA mostraram que a componente de BrC pode responder por um alto valor, de cerca de 25% da absorção total, enquanto no arco do desmatamento ele responde por cerca de 12%.

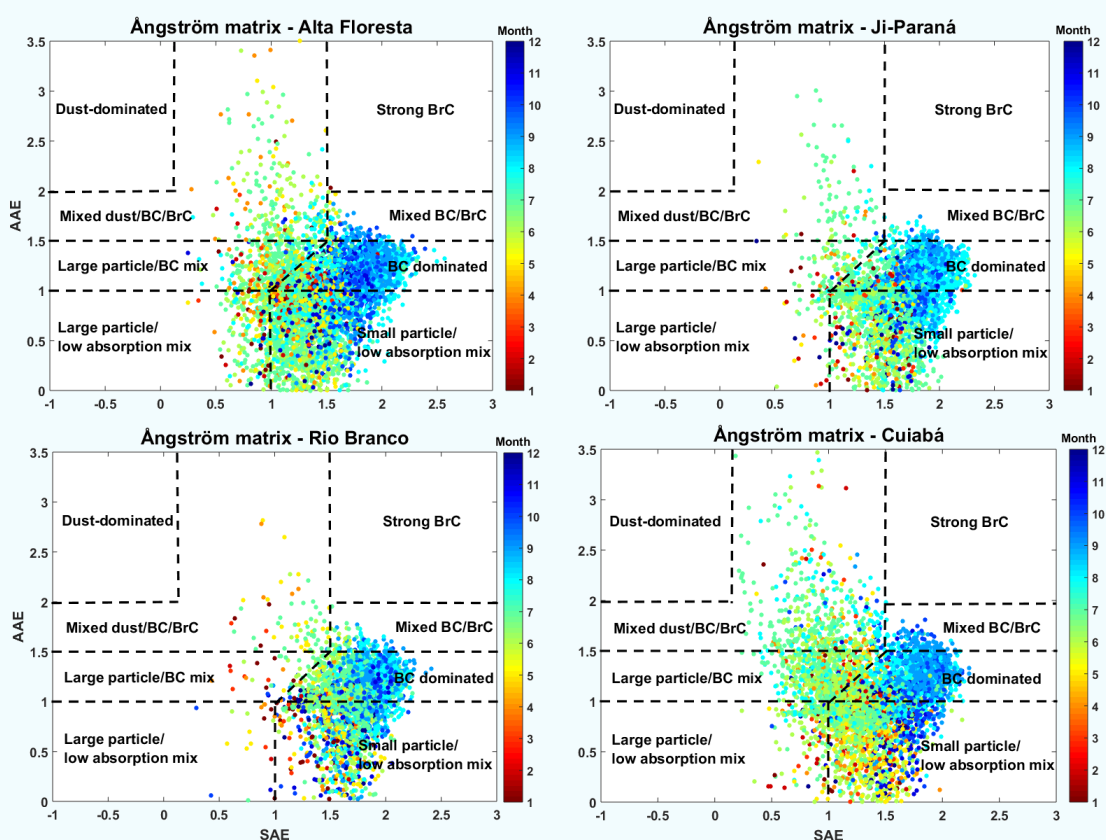
Figura 24 - Distribuição espacial das medidas de BC e BrC, onde observamos em amarelo a porcentagem de BC e em azul a porcentagem de BrC para o AAO em 440nm.



Fonte: Fernando G. Morais

A longa série de dados de fotômetro na Amazônia nos permite calcular matrizes de Ångström, as quais são uma combinação do expoente de absorção de Ångström (AAE) e do expoente de espalhamento de Ångström (SAE). Estes são combinados para deduzir a especiação química com base na dependência espectral das propriedades óticas (CAZORLA et al., 2013). O gráfico de AAE vs. SAE, que representa a chamada Matriz de Ångström, pode ser dividido em áreas associadas com diferentes tipos de aerossóis (BAHADUR et al., 2012). Aplicamos esta metodologia para todos os sítios amazônicos, e os resultados para os sítios no arco do desmatamento são apresentados na Figura 25.

Figura 25 - Matrizes de Ångström a partir de dados de fotômetro da rede AERONET no arco do desmatamento, mostrando comportamento similar quanto à natureza do aerossol entre sítios mais de 1000 km distantes entre si e em operação por mais de 20 anos.



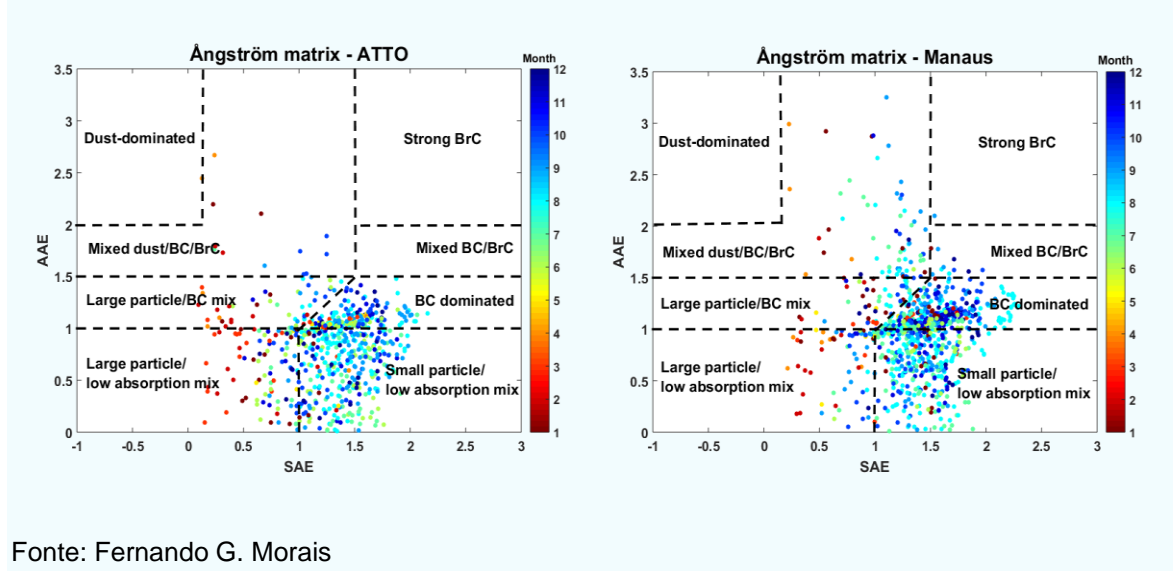
Fonte: Fernando G. Morais

Essa região chamada de arco do desmatamento compreende uma porção da floresta Amazônica onde encontram-se os maiores índices de desmatamento (CARRERO et al., 2020). É um território que vai do oeste do Maranhão e sul do Pará em direção a oeste, passando por Mato Grosso, Rondônia e Acre (FISCH et

al., 2004). O monitoramento por satélite da taxa de desmatamento da floresta Amazônica brasileira está disponível com dados desde 2004 realizado pelo INPE em [http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/prodes com dados](http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/prodes%20com%20dados).

Ao analisarmos as matrizes de Ångström calculadas através de dados de fotômetros da rede AERONET, notamos um comportamento similar nos sítios de Alta Floresta (MT), Ji-Paraná (RO), Rio Branco (AC) e Cuiabá (MT), onde os meses de agosto a novembro compreendem a época da estação seca e de maior índice de queimadas, onde o BC é dominante nesses sítios analisados. Por outro lado, calculando as matrizes de Ångström para as regiões com menores concentrações de aerossóis e menos impactadas por queimadas, onde se encontram os sítios ATTO e Manaus EMBRAPA, observamos um perfil levemente diferente, conforme pode ser observado na Figura 26.

Figura 26 - Matrizes de Ångström a partir de dados de fotômetro da rede AERONET no sítio do ATTO e Manaus EMBRAPA, mostrando o domínio de BC durante os meses de julho a novembro e influência de *Dust* nos meses de janeiro a abril.

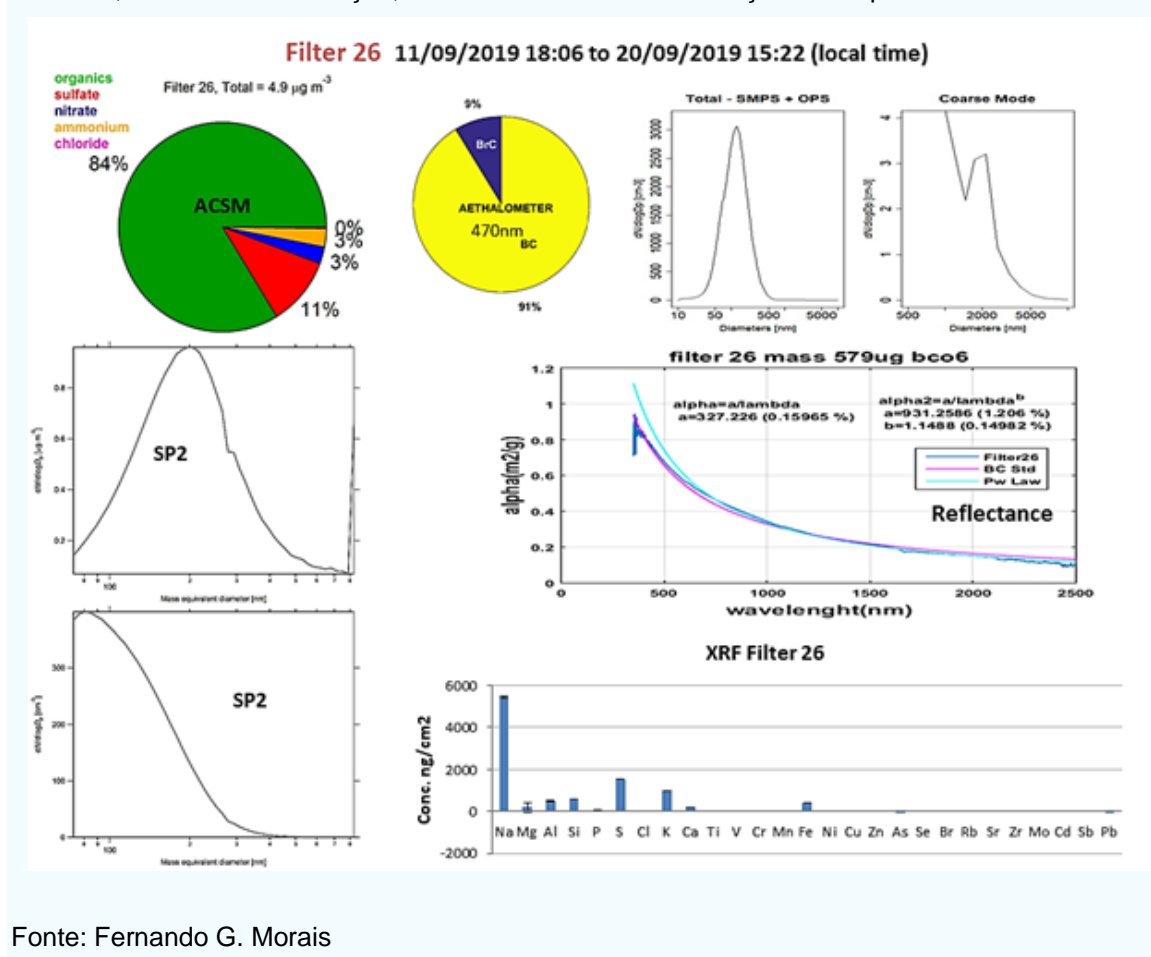


Estas matrizes de Ångström para os sítios do ATTO e Manaus EMBRAPA, além de mostrar BC dominante nos meses de agosto a novembro (estação seca), também nos mostram a existência de *Dust* e uma mistura de *Dust/BC/BrC* nos meses de janeiro a abril, que correspondem ao período de chegada de *Dust* e de emissões de queimadas proveniente do norte da África (HOLANDA et al., 2019; MORAN-ZULOAGA et al., 2018; PÖHLKER, C. et al., 2019; PÖHLKER, M. L. et al., 2016). Há uma significativa coerência entre estes trabalhos e nossos resultados.

5.2 Resultados relativos às medidas de absorção *in situ*

Durante o ano de 2019, entre os meses de março a novembro, foram coletados no sítio ATTO 34 filtros Nuclepore na fração de tamanho de PM_{2.5} (dp<2.5 µm), localizado acima da copa das árvores, conforme descrito nesta tese no capítulo 4, item 4.27. Para o entendimento dos processos físico-químicos envolvidos, realizamos análises de refletâncias com espectrômetros óticos de alta resolução e análise de composição química com fluorescência de raio-X nestas amostras. Ao mesmo tempo, foram realizadas medidas de absorção, espalhamento, distribuição de tamanho das partículas totais, distribuição de tamanho das partículas de BC e análise química em tempo real com o uso de ACSM e outros instrumentos em paralelo às coletas de filtros.

Figura 27- Um resumo de todas as medidas realizadas em paralelo durante a amostragem dos filtros Nuclepore no sítio do ATTO em 2019, a saber, medidas de composição química, distribuições de tamanho, refletância e absorção, com o intuito de atribuir a fração correspondente de BrC e BC.



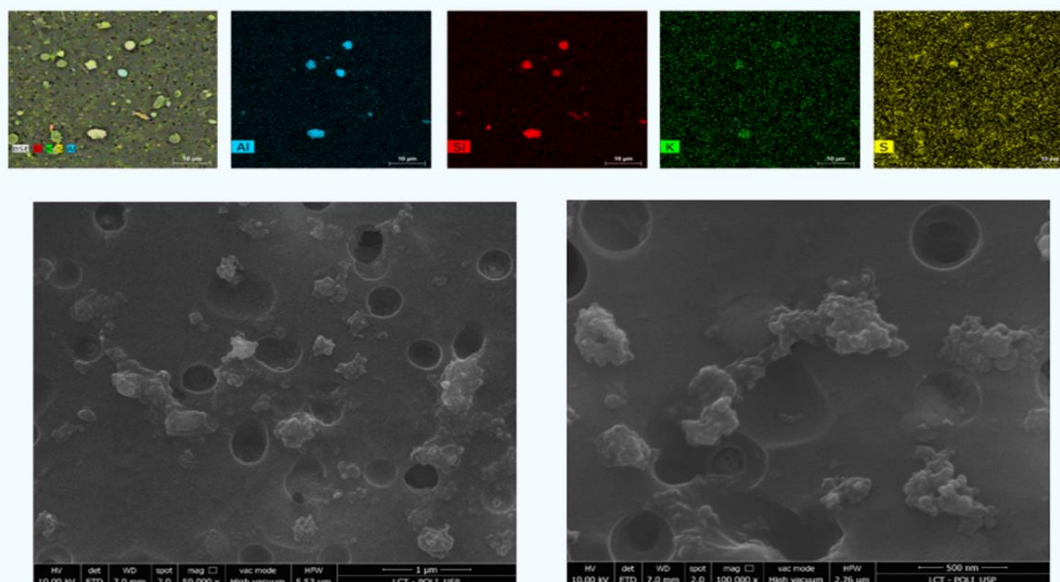
Fonte: Fernando G. Morais

A Figura 27 apresenta um resumo de todas as medidas feitas simultaneamente a amostragem de cada filtro e das análises subsequentes. O exemplo é para o filtro 26, mas tal procedimento foi aplicado para cada um dos 34 filtros em questão. A partir desta coleção de resultados paralelos, pudemos criar tabelas que permitiram a intercomparação dos dados, de modo a entender os processos que estavam envolvidos na produção ou constatação das frações de BC e BrC.

5.2.1 Análises de partículas individuais com MEV e espectros EDS

Para termos uma ideia da origem e forma dos aerossóis coletados nos filtros de Nuclepore, fizemos análises de microscópio eletrônico de varredura (MEV) e análises por energia dispersiva (EDS) em oito amostras, sendo quatro delas para o período chuvoso e quatro para o período seco na Amazônia. A Figura 28 nos mostra um exemplo, neste caso, o filtro 26 amostrado na estação seca.

Figura 28 – Análises de MEV e EDS para o filtro de Nuclepore 26 coletados na Amazônia na estação seca entre 11/09/2021 às 18:06 e 20/09/2019 às 15:22.

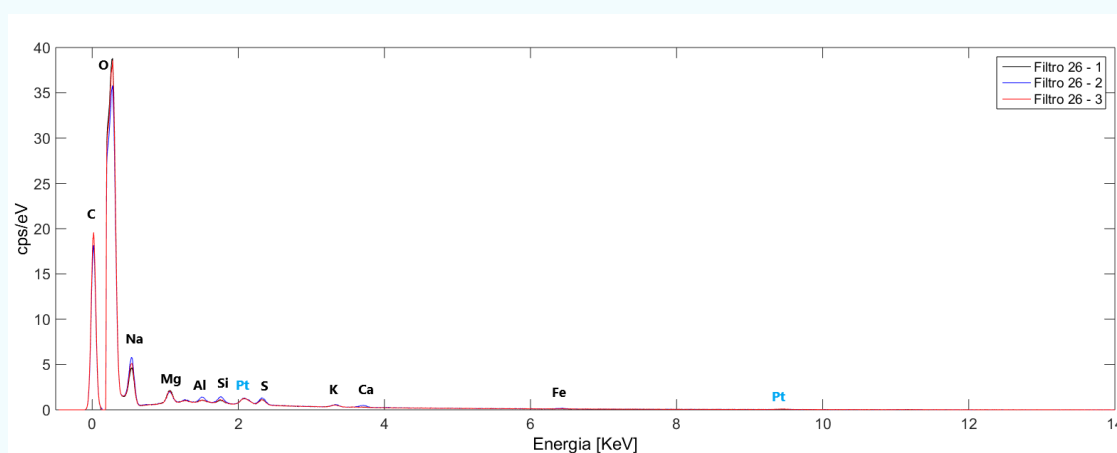


Fonte: Fernando G. Morais

Podemos observar aglomerados de aerossóis depositados nos filtros, o que mostrou que a parte experimental de coleta de filtros foi bem realizada e nos permitiu análises químicas e óticas precisas. A técnica de EDS, explicada no capítulo 4 desta tese, nos permitiu observar a assinatura química dos componentes

depositados nos filtros Nuclepore para alguns elementos químicos durante o período de amostragem dos filtros. A Figura 29 mostra o exemplo do filtro 26, onde podemos observar a presença de alumínio, silício, potássio e enxofre. As análises de MEV e EDS foram realizadas no Laboratório de Caracterização Tecnológica (LCT), um laboratório multiusuário localizado na Universidade de São Paulo (USP).

Figura 29 – Espectro obtido a partir da repetição de 3 medidas EDS para o filtro Nuclepore 26 coletados na Amazônia na estação seca entre 11/09/2021 às 18:06 e 20/09/2019 às 15:22. A Platina (Pt) presente foi adicionada para preparo da amostra na técnica de MEV.



Fonte: Fernando G. Morais

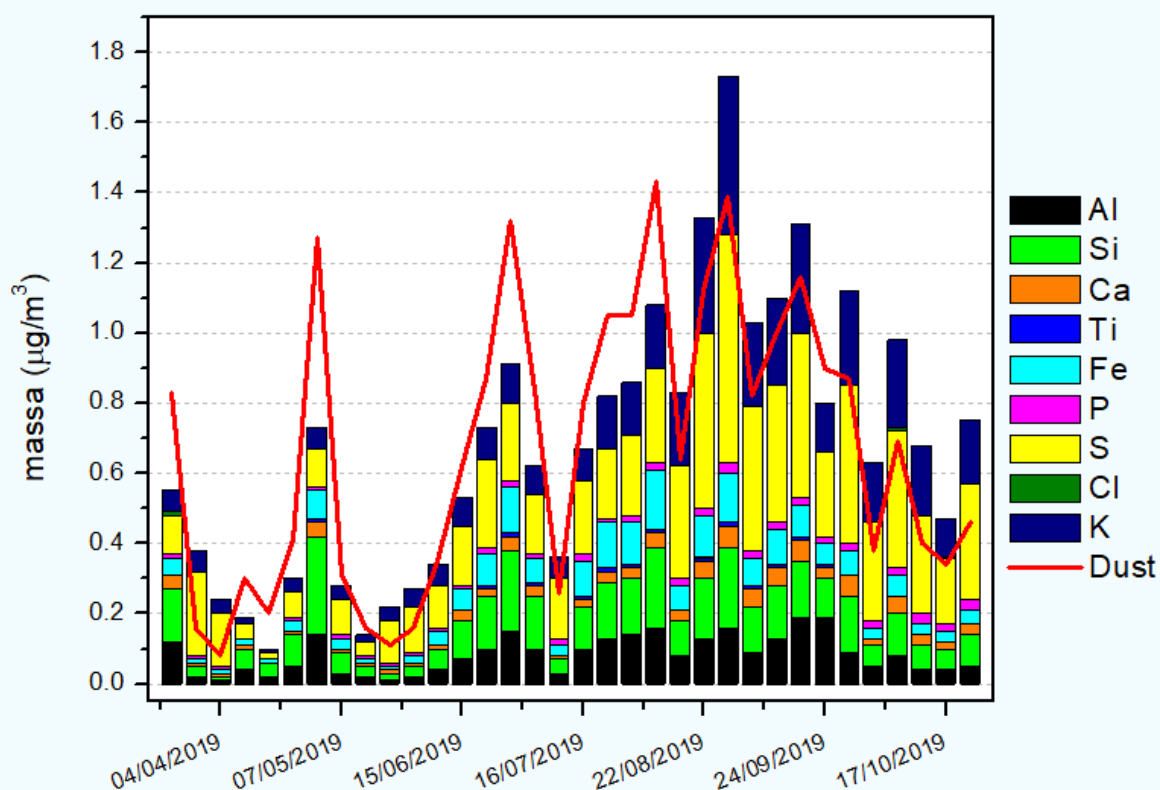
O espectro de EDS evidencia a presença de silicatos e carbonatos no aerossol amostrado, cujos principais elementos constituintes são o Silício (Si), Alumínio (Al), Potássio (K), Cálcio (Ca) e o Ferro (Fe), este último como contaminante dos silicatos e carbonatos. O enxofre (S) pode ter por fonte sulfatos orgânicos e inorgânicos. O oxigênio (O) e o Carbono (C) estão presente em todos os compostos orgânicos e inorgânicos, sendo que o carbono também está relacionado principalmente às frações de BC e BrC.

5.2.2 Análise química dos aerossóis por FRX

Para melhor compreensão dos componentes químicos presentes na amostra, utilizamos a metodologia descrita no capítulo 4. A partir destas medidas, várias abordagens podem ser usadas para obter a concentração de *Dust* e, em geral, se utiliza um único elemento traçador, como Al. A abordagem aplicada neste trabalho (MAENHAUT et al., 2005) utiliza dados para os principais elementos presentes em *Dust* (ou seja, Al, Si, Ca, Ti e Fe) simultaneamente, logo, é mais

precisa do que as estimativas com base em um único elemento. É importante salientar que as análises de FRX por energia dispersiva, como as realizadas no nosso laboratório, podem fornecer dados consistentes para esses cinco elementos.

Figura 30 – Massa correspondente de cada elemento químico presente nas 34 amostras obtidas com FRX e cálculo de massa correspondente de *Dust* em vermelho.



Fonte: Fernando G. Morais

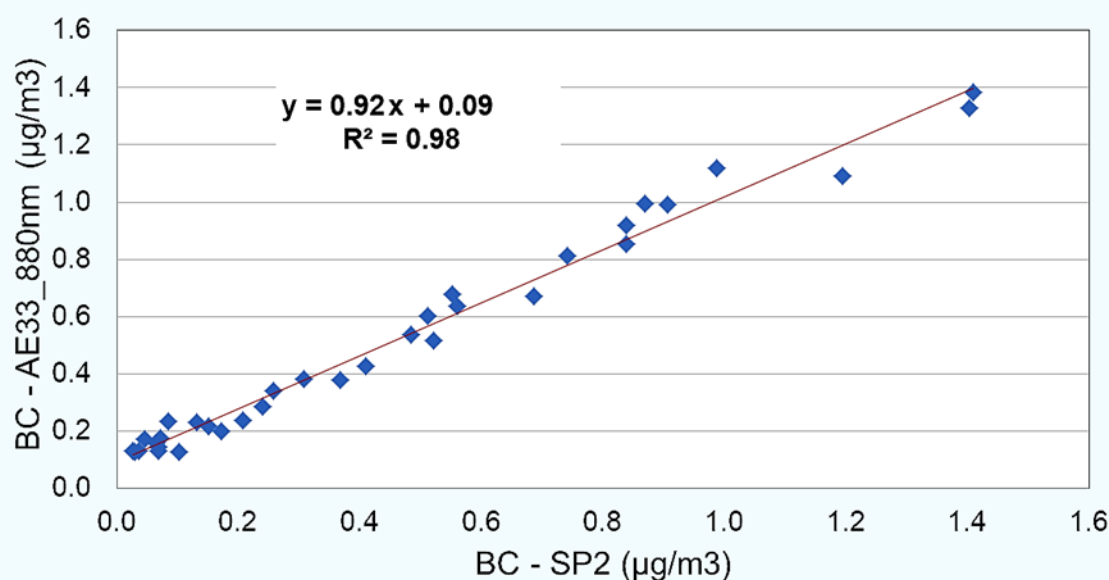
As análises de FRX e o cálculo de massa de *Dust* nos proporcionaram observar, de acordo com a Figura 30, três picos distintos de aerossol. O primeiro pico entre março e abril pode estar correlacionado ao transporte de *Dust* do Saara, conforme observado por HOLANDA et al. (2019). O segundo pico em julho pode estar correlacionado com as queimadas na África Central e também está de acordo com o estudo de HOLANDA et al. (2019). O terceiro pico é bem característico na estação seca na Amazônia entre agosto e setembro, com fortes emissões relacionadas a queima de biomassa local. A curva em vermelho na Figura 30 representa a massa de *Dust* calculada de acordo com a equação 4.6. Importante notar que a massa de *Dust* não acompanha a soma dos elementos traços, pois a

fração de material carbonáceo não é levado em conta nestes cálculos, e a componente de sulfato é relevante na massa total.

5.2.3 Determinação da absorção dos aerossóis por vários métodos

A medida de referência utilizada neste trabalho para caracterizar o BC na Amazônia foi o instrumento SP2 (*Single Particle Soot Photometer – Droplet Measurement Techniques, Longmont, USA*), que mede os sinais de dispersão e incandescência dependentes do tempo produzidos por partículas únicas de aerossol ao cruzar um feixe de laser intenso, descrito em detalhes no capítulo 4 desta tese. Outro instrumento utilizado para obtermos a informação de absorção de BC foi o Aetalômetro AE33, também descrito na seção de métodos, no referido capítulo. A Figura 31 mostra a curva de correlação para os valores médios obtidos no mesmo período de amostragem de cada um dos 34 filtros, entre as medidas de absorção pelo SP2 e as medidas de absorção do AE33, com os dados de AE33 corrigidos de acordo com RIZZO et al. (2011), com um R^2 de 0.98.

Figura 31 - Comparação entre o BC obtido por diferentes instrumentos, para o período de amostragem dos 34 filtros coletados na Amazônia em 2019.



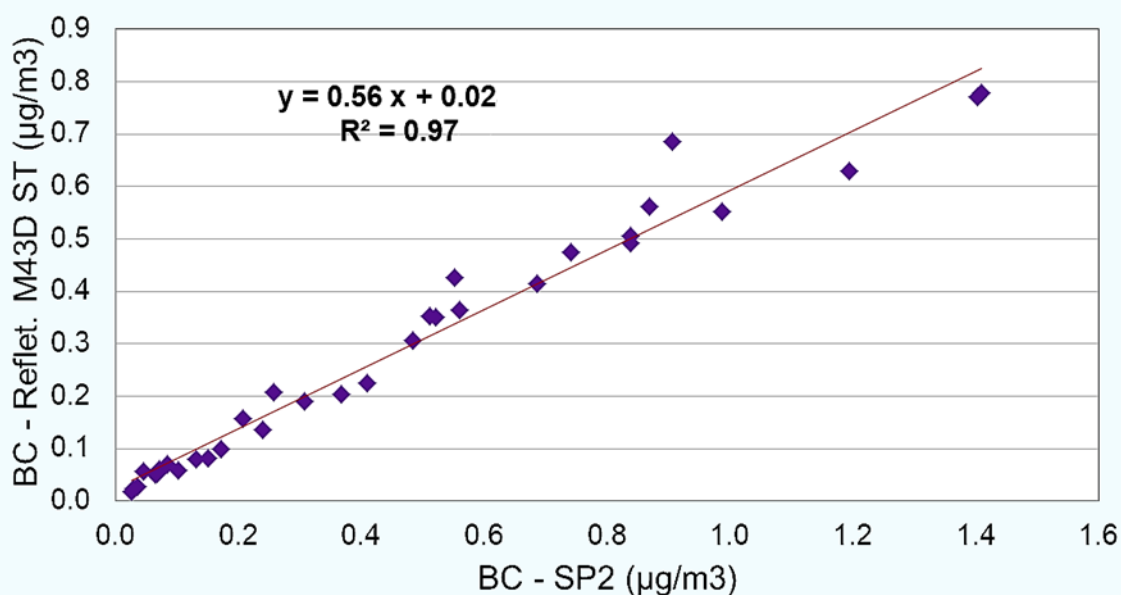
Fonte: Fernando G. Morais

A Figura 31 apresentada mostra uma excelente correlação entre as medidas de BC feitas independentemente por dois equipamentos que usam técnicas diferentes. Isso mostra a qualidade das medidas realizadas e a alta confiabilidade

dos dados e instrumentação, pois a ótima comparação entre as medidas de BC mostradas no gráfico nos dá bastante confiança de que a componente de absorção do BC medida no sítio ATTO por instrumentos *in situ*, poderia ser utilizada para comparações com as medidas indiretas de BC por análises de refletômetros óticos.

O refletômetro ótico M43D *Smoke Stain* é um instrumento relativamente simples de ser utilizado e pode fornecer dados interessantes e de forma rápida de BC depositado em filtros a partir de uma equação simples (Eq. 4.4). A Figura 32 apresenta a comparação entre a medida de referência de BC obtido pelo SP2 e a medida indireta de BC pelo refletômetro M43D *Smoke Stain*, que tem um alto R^2 de 0.97. A medida indireta de BC pelo refletômetro *Smoke Stain* representa a variabilidade da medida real de BC no ATTO, mas precisa ser corrigida através da equação obtida e aproximada por $y = 0.57 \cdot x$.

Figura 32 - Comparação entre o BC obtido por SP2 (*Single Particle Soot Photometer*) e medida indireta de BC pelo refletômetro M43D *Smoke Stain*, para os 34 filtros coletados na Amazônia em 2019.



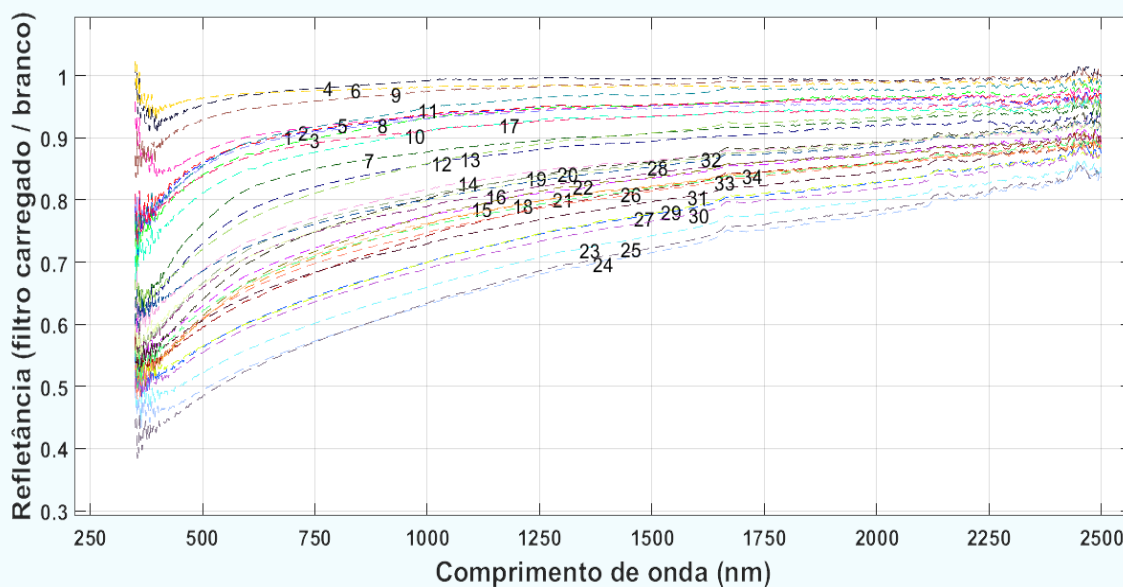
Fonte: Fernando G. Morais

5.2.4 Absorção espectral por refletômetros de alta resolução

A partir dos dados dos espectrômetros óticos de alta resolução, obtivemos as curvas de refletância dos filtros carregados de aerossol. Analisamos também os

filtros em branco, para subtrair seus efeitos. A Figura 33 mostra a refletância entre 300 e 2500 nm, já descontado o efeito do filtro em branco.

Figura 33 – Medida de refletância para os 34 filtros amostrados no sítio ATTO na Amazônia, obtido por espectrômetro ótico de alta resolução de 300 – 2500 nm, já descontado o efeito do fundo branco do filtro limpo e não amostrado.

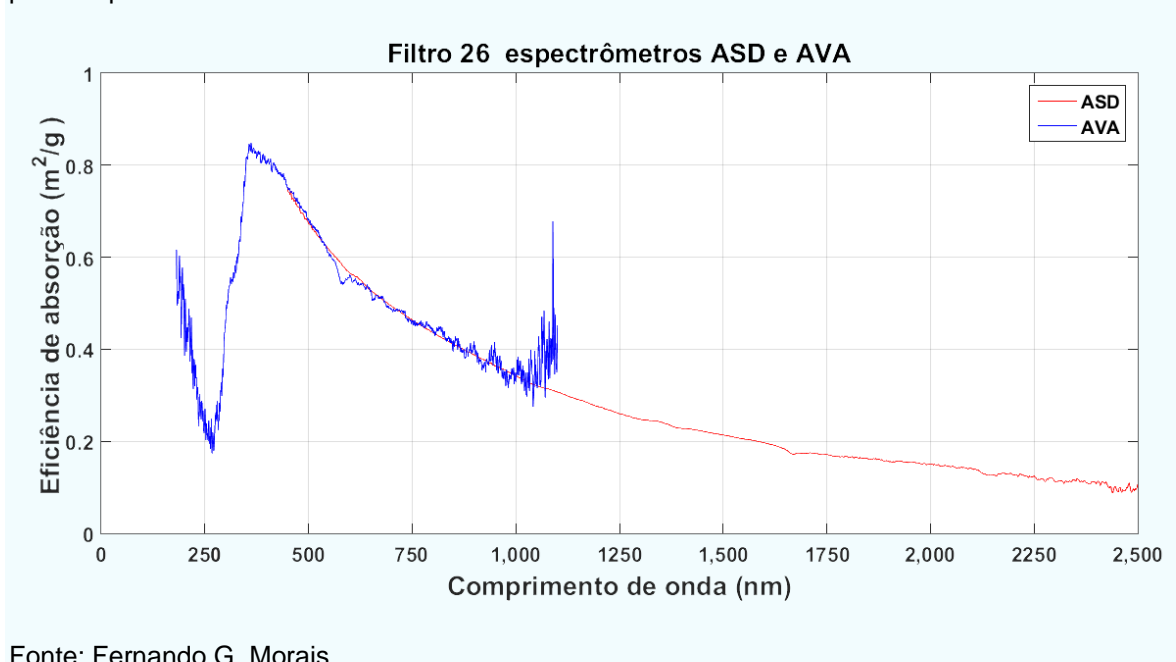


Fonte: Fernando G. Morais

Utilizando o método desenvolvido por Martins et al. (2009), foi possível calcular a eficiência de absorção espectral em m^2/g do aerossol depositado em cada um dos 34 filtros para os dois espectrômetros com diferentes fontes de iluminação de banda larga. O primeiro foi um Avantes AvaSpec 2048, que mede a partir de 300 nm (UV) até 1100 nm (NIR) com uma fonte de luz UV-VIS de alta potência da Hamamatsu modelo L10290 (o qual vamos nos referir de agora em diante por AVA). O segundo foi um FieldSpec Pro da Analytical Spectral Devices, com alcance de 350 nm a 2500 nm com uma lâmpada de refletância da ASD Inc (o qual vamos nos referir de agora em diante por ASD).

A Figura 34 mostra a eficiência de absorção a partir dos dados obtidos pelos dois espectrômetros. Estamos usando o filtro 26 como referência e exemplo nesta tese, embora os mesmos cálculos foram obtidos para os 34 filtros amostrados. Os dados do AVA foram minimamente ajustados usando como referência o espectrômetro ASD no intervalo de 400 nm a 969 nm.

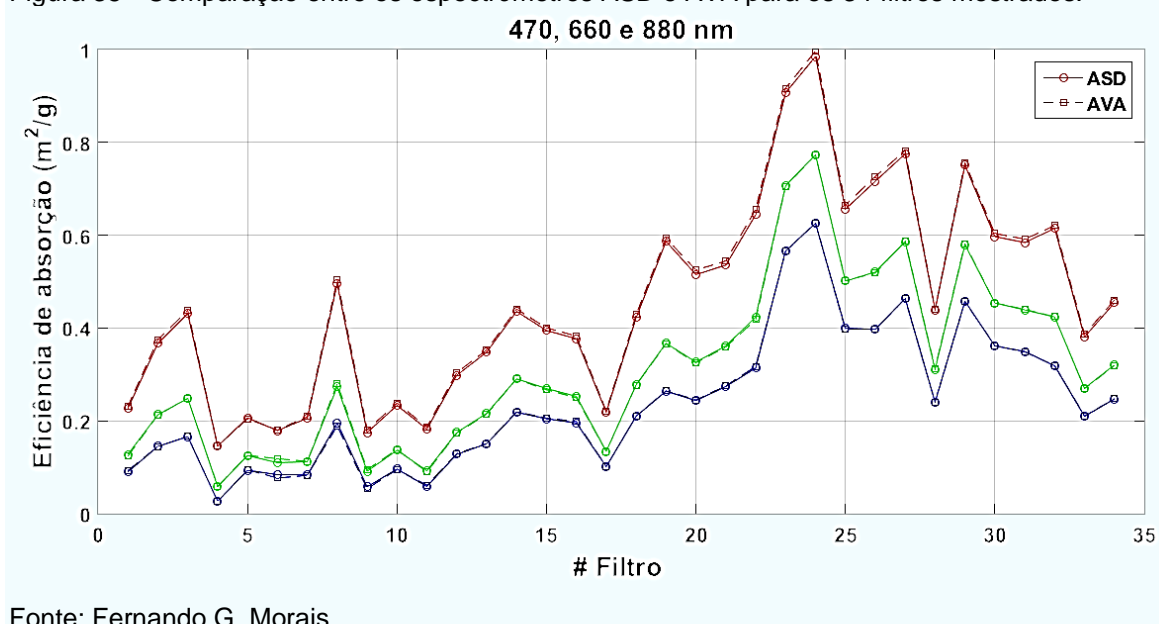
Figura 34 – Medidas de refletância já convertida em eficiência de absorção para o filtro 26, obtidas pelos espectrômetros AVA e ASD.



Fonte: Fernando G. Morais

Os dois espectrômetros forneceram valores similares, e as séries temporais das eficiências de absorção podem ser comparadas na Figura 35. Os comprimentos de onda 470nm (vermelho), 660nm (verde) e 880nm (azul) foram extraídos das eficiências de absorção espectrais (como na Figura 34), e foram utilizados posteriormente no cálculo de separação entre BC e BrC através da abordagem desenvolvida por WANG, XUAN et al.(2016).

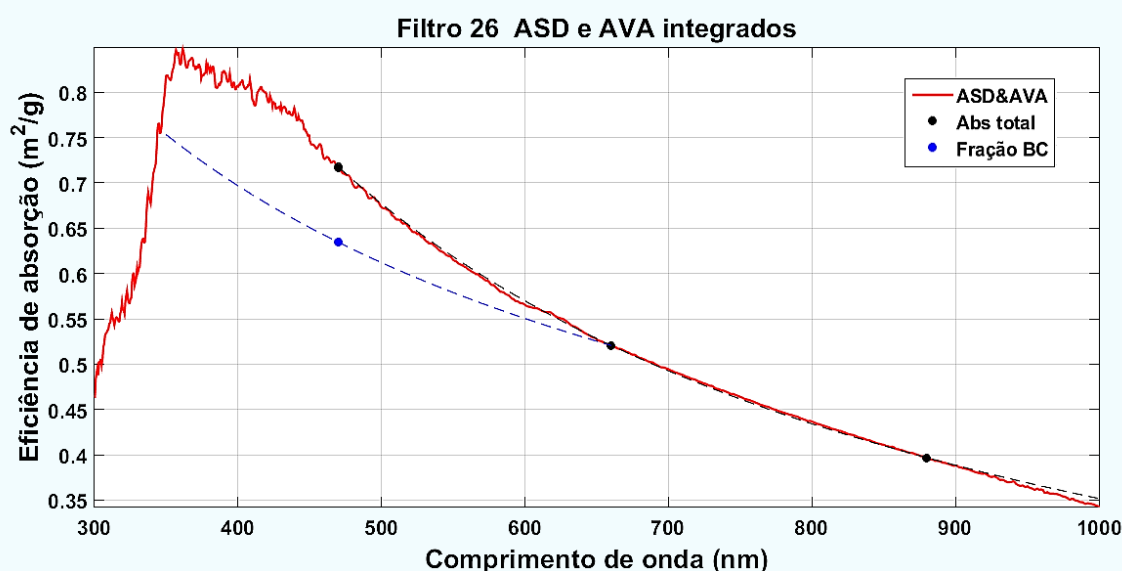
Figura 35 - Comparação entre os espectrômetros ASD e AVA para os 34 filtros mostrados.



Fonte: Fernando G. Morais

Conforme descrito no capítulo 4, o algoritmo utilizado para separar a fração de BC e BrC a partir de dados de absorção, utiliza a absorção em 3 comprimentos de onda. No nosso caso, utilizamos 470, 660 e 880 nm, pois são medidas que podemos obter também através do uso de Aetalômetros, permitindo comparações entre instrumentos diferentes. Através de cálculo Mie, o algoritmo estima a contribuição do BC no menor comprimento de onda, assumindo que este é o único responsável pela absorção nos dois comprimentos de onda maiores. Assim, obtivemos para cada um dos 34 filtros a fração de BC correspondente, mostrado na Figura 36 para o filtro 26.

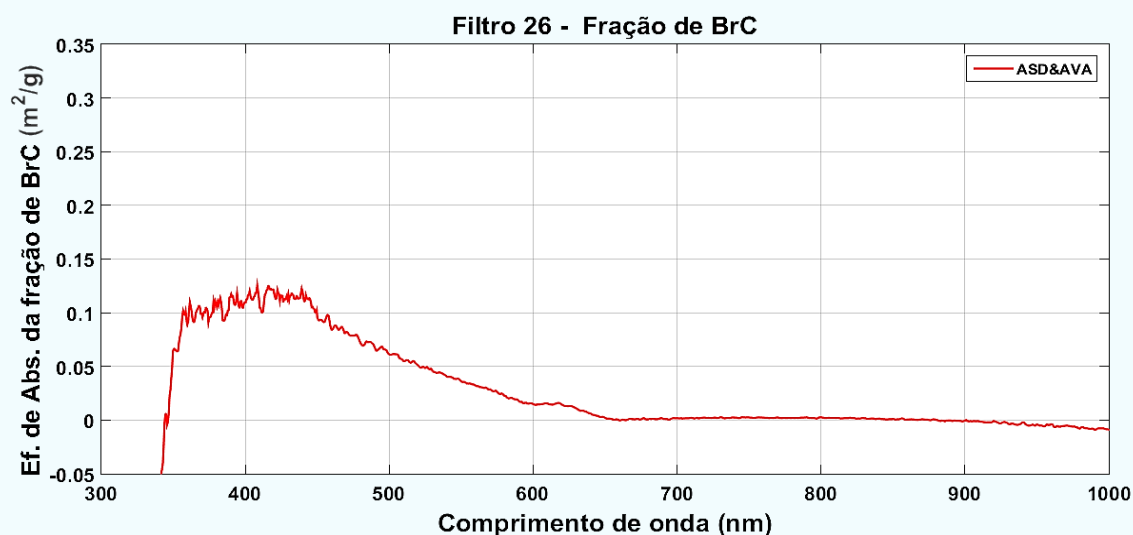
Figura 36 - Eficiência de absorção total e a fração de BC calculada a partir de dados de refletância obtidas pelos refletômetros ASD e AVA integrados para o filtro 26. A Fração de BC foi calculada a partir do algoritmos de *WANG, XUAN et al. (2016)*.



Fonte: Fernando G. Morais

A diferença entre a eficiência de absorção total e a fração de BC calculada proporcionou diretamente a medida de BrC espectral em m²/g. A Figura 37 apresenta o resultado desta subtração e mostra a dependência espectral da eficiência de absorção do BrC para o filtro 26. Podemos observar que a fração de BrC é nula a partir de 660 nm, justamente porque assumimos que a contribuição de absorção de BrC é desprezível a partir de 660 nm, o que é apoiado pelas medições de laboratório (CHEN; BOND, 2010; KIRCHSTETTER et al., 2004; YANG et al., 2009; ZHANG, X. et al., 2013).

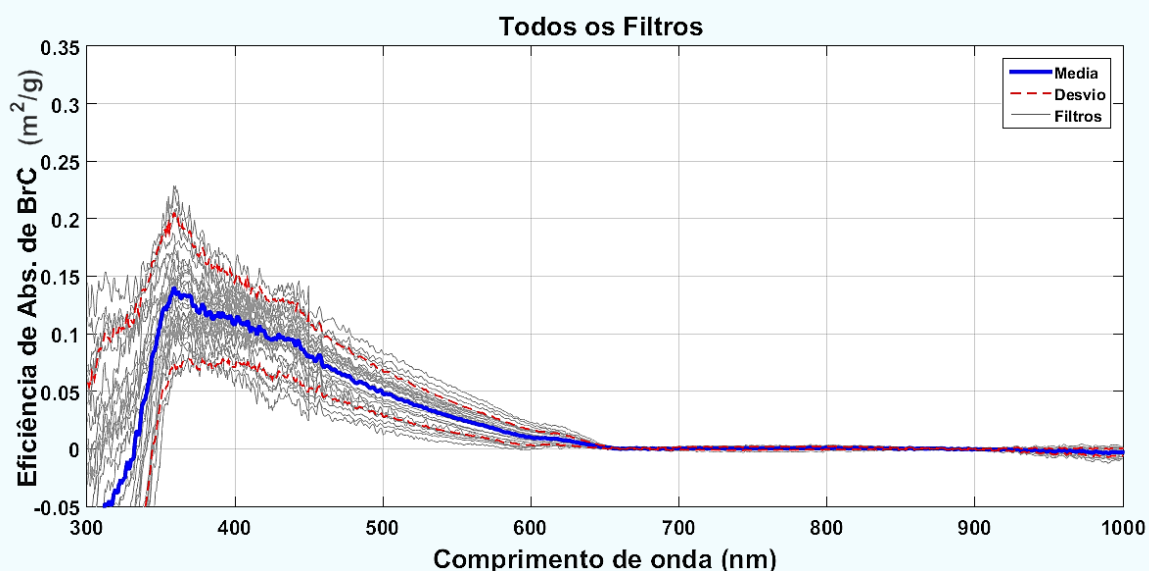
Figura 37 - A dependência espectral da eficiência de absorção do BrC para o filtro 26.



Fonte: Fernando G. Morais

A Figura 38 nos mostra a dependência espectral do BrC para os 34 filtros Nuclepore medidos na Amazônia em 2019.

Figura 38 - Dependência espectral do BrC para os 34 filtros coletados no ATTO na Amazônia.

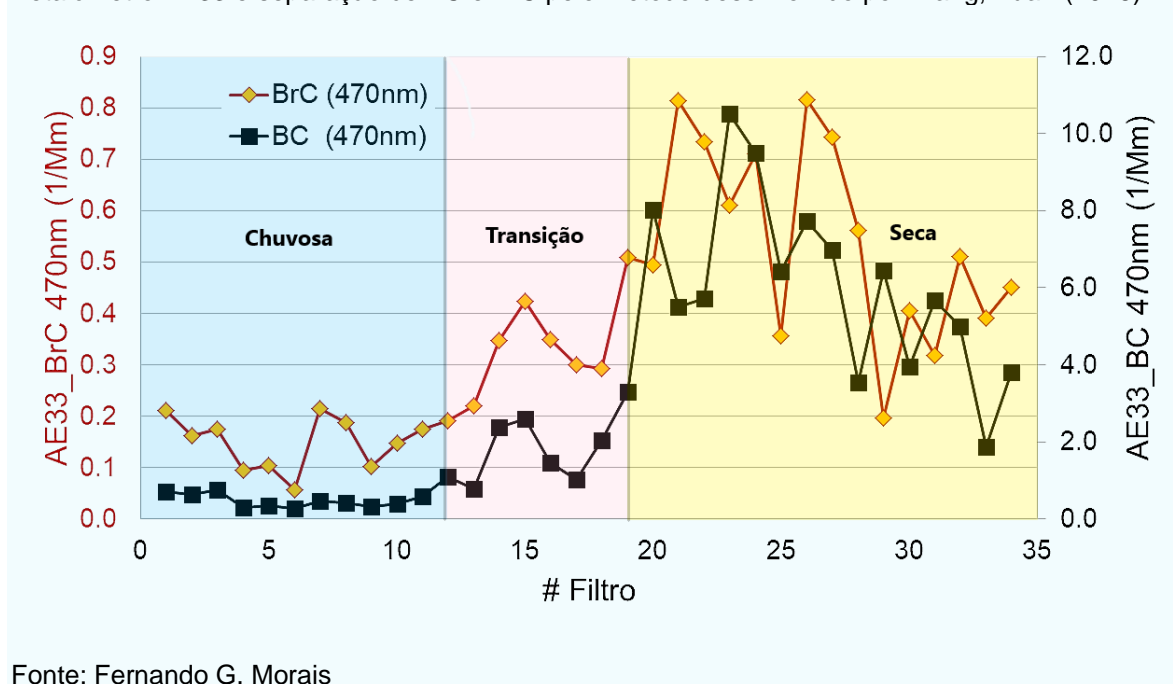


Fonte: Fernando G. Morais

É possível observar as características de absorção do BrC em função do comprimento de onda. Os resultados mostram que a absorção de BrC é significativa abaixo de 660 nm e é máxima em comprimentos de onda próximos a 370 nm, apresentando pouca variação ao longo do ano, apesar de incluirmos filtros das estações seca e chuvosa.

Utilizando dados de Aetalômetro, também foi possível calcular a fração de BrC e BC no coeficiente de absorção (1/Mm) dos aerossóis, onde separamos as frações de BC e BrC novamente usando o método desenvolvido por Wang et al. (2016). Este procedimento permitiu obter o comportamento da variabilidade da fração de BrC e BC em função da absorção total. A Figura 39 mostra o comportamento da absorção por BrC e BC durante o período de março a novembro de 2019, a partir dos dados do Aetalômetro, para os mesmos períodos de amostragem dos filtros Nuclepore no sítio do ATTO na Amazônia. Devido a diferença nas magnitudes, utilizamos eixos verticais com escalas diferentes para BrC e BC.

Figura 39 - Série temporal do BC e BrC no sítio ATTO na Amazônia em 2019, com dados de Aetalômetro AE33 e separação de BC e BrC pelo método desenvolvido por Wang, Xuan (2016).



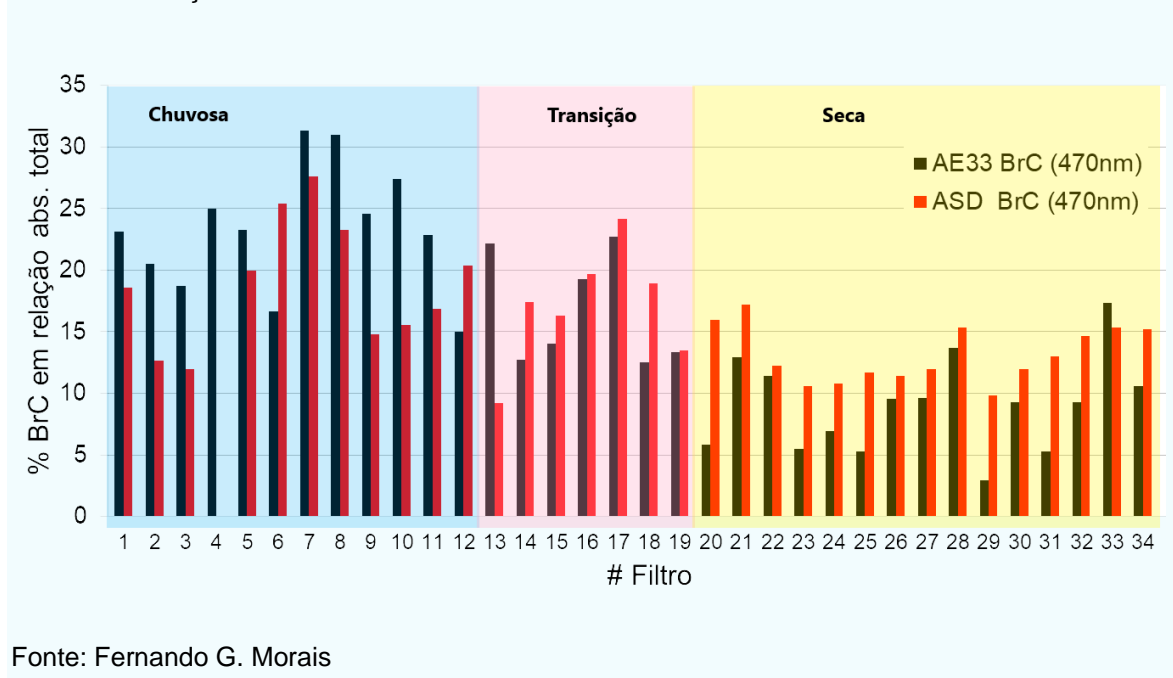
Fonte: Fernando G. Morais

Podemos observar uma maior porcentagem de BrC em relação ao BC para a estação chuvosa, e isso faz sentido pois praticamente não temos transporte significativo de BC de longas distâncias por conta da deposição úmida. Porém, no período seco, a quantidade de BC é muito maior do que a de BrC, principalmente devido ao efeito da queima de biomassa transportada.

A fração média de BrC para absorção total em 470 nm, medido no sítio do ATTO na Amazônia em 2019, para o espectrômetro ótico ASD, foi de 15.9% \pm 4.6. A mesma análise para as medidas com o Aetalômetro AE33 foi de 14.9% \pm 8.3. Isso significa que a absorção de BrC é um componente importante nos aerossóis da

Amazônia Central. A Figura 40 mostra como a fração de BrC responde em função da sazonalidade, entre estação seca (fevereiro a maio), estação de transição (junho e julho) e estação chuvosa (de agosto a novembro).

Figura 40 – Sazonalidade do BrC em relação à absorção total para o sítio do ATTO na Amazônia em 2019 para os 34 filtros amostrados. Em azul estação chuvosa, roxo estação de transição e amarelo a estação seca.



Fonte: Fernando G. Morais

Podemos observar que, para a estação chuvosa, temos uma média de aproximadamente 21% de BrC em relação à absorção total do aerossol, enquanto, para a estação de transição e seca, respectivamente, uma média de 17% e 11% de BrC. Estas diferenças são importantes no balanço radiativo espectral. Notamos também que o espectrômetro ASD apresenta tipicamente valores mais altos na estação seca comparados com o AE33, enquanto o AE33 mostra valores mais altos na estação chuvosa. Isso se deve às diferentes características de absorção destas partículas em cada estação e às diferentes técnicas de medidas dos dois instrumentos.

5.2.5 Correlações das propriedades medidas com a massa de orgânicos

As medidas *in situ* realizadas pelo ACSM no sítio do ATTO na Amazônia nos proporcionaram medir, para cada filtro, a massa de Orgânicos, Sulfatos, Nitratos, Amônio e Cloreto em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ em paralelo com os filtros de Nuclepore amostrados e,

assim, fazer correlações com as medidas de absorção de BC e BrC, espalhamento e *Dust*. A Tabela 1 mostra o compilado destes dados.

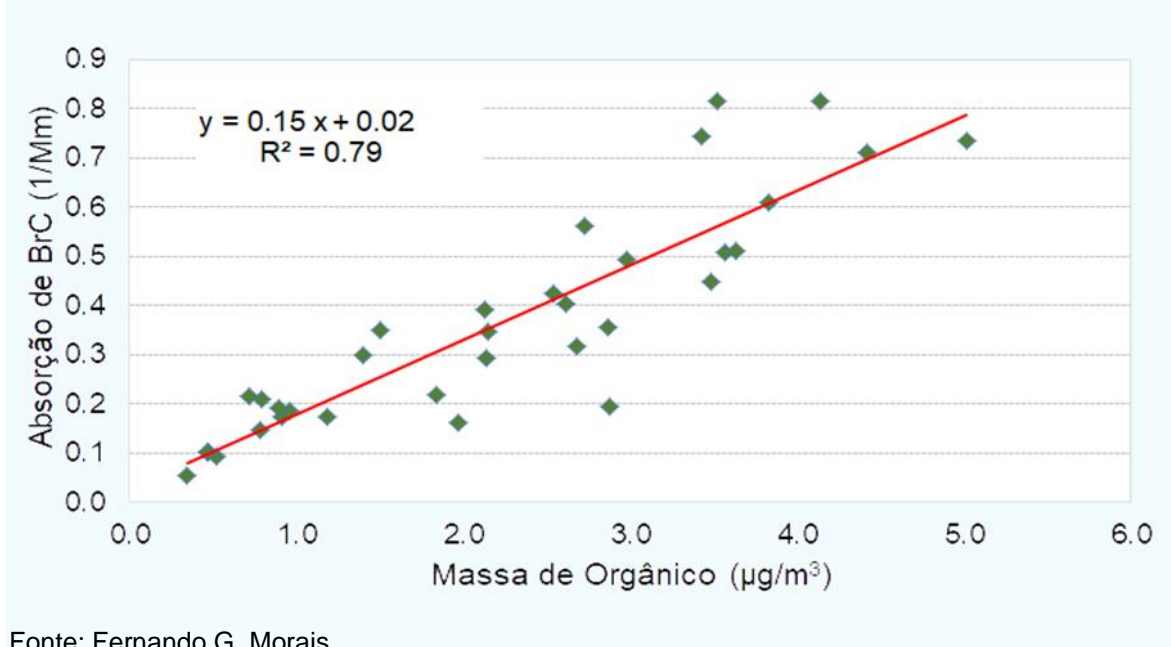
Tabela 1 – Dados de massa em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para a componente química, medida pelo ACSM em 2019 no sítio do ATTO na Amazônia, para os 34 filtros amostrados no período.

Filtro	Início	Fim	Orgânico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Sulfato ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Nitrato ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Amônio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Cloreto ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
1	26/03/2019	01/04/2019	0.79	0.08	0.04	0.01	0.01
2	01/04/2019	04/04/2019	1.97	0.26	0.08	0.10	0.01
3	04/04/2019	09/04/2019	1.19	0.16	0.05	0.03	0.01
4	09/04/2019	15/04/2019	0.52	0.04	0.02	0.01	0.00
5	20/04/2019	26/04/2019	0.48	0.06	0.02	0.01	0.00
6	15/04/2019	20/04/2019	0.34	0.03	0.02	0.01	0.00
7	26/04/2019	07/05/2019	0.72	0.09	0.04	0.02	0.01
8	07/05/2019	14/05/2019	0.96	0.09	0.04	0.02	0.00
9	14/05/2019	21/05/2019	0.46	0.05	0.02	0.02	0.00
10	21/05/2019	30/05/2019	0.79	0.08	0.03	0.01	0.01
11	30/05/2019	06/06/2019	0.91	0.14	0.03	0.03	NaN
12	06/06/2019	15/06/2019	0.90	0.14	0.03	0.03	NaN
13	15/06/2019	22/06/2019	1.84	0.21	0.06	0.07	NaN
14	22/06/2019	27/06/2019	2.15	0.28	0.08	0.08	NaN
15	27/06/2019	03/07/2019	2.54	0.27	0.09	0.09	NaN
16	03/07/2019	11/07/2019	1.50	0.20	0.07	0.05	0.00
17	11/07/2019	16/07/2019	1.40	0.20	0.06	0.05	0.01
18	16/07/2019	25/07/2019	2.14	0.25	0.08	0.08	0.01
19	25/07/2019	01/08/2019	3.57	0.13	0.11	0.16	0.02
20	01/08/2019	07/08/2019	2.98	0.25	0.10	0.10	0.02
21	07/08/2019	14/08/2019	3.52	0.27	0.12	0.10	0.01
22	14/08/2019	22/08/2019	5.02	0.52	0.15	0.13	0.01
23	22/08/2019	28/08/2019	3.83	0.68	0.13	0.16	0.01
24	28/08/2019	03/09/2019	4.42	0.68	0.14	0.18	0.01
25	03/09/2019	11/09/2019	2.86	0.44	0.10	0.12	0.01
26	11/09/2019	20/09/2019	4.14	0.52	0.13	0.14	0.01
27	20/09/2019	24/09/2019	3.43	0.40	0.11	0.11	0.01
28	24/09/2019	29/09/2019	2.72	0.27	0.09	0.07	0.01
29	29/09/2019	03/10/2019	2.88	0.44	0.10	0.12	0.01
30	03/10/2019	10/10/2019	2.62	0.30	0.09	0.10	0.01
31	10/10/2019	14/10/2019	2.68	0.37	0.09	0.10	0.01
32	14/10/2019	17/10/2019	3.64	0.35	0.12	0.13	0.01
33	17/10/2019	26/10/2019	2.13	0.23	0.08	0.08	0.01
34	26/10/2019	31/10/2019	3.48	0.40	0.12	0.13	0.01

Fonte: Fernando G. Morais

A medida da massa de orgânicos é essencial para o desenvolvimento deste trabalho, pois ANDREAE; GELENCSEK (2006) definiram que o BrC consiste em partículas de carbono orgânico com propriedades de absorção de radiação na região do ultravioleta e visível. Assim, para entendermos tal comportamento, a Figura 41 apresenta o BrC em função da massa de orgânico.

Figura 41 - Análise entre BrC derivado do AE33 e a massa de aerossóis orgânicos.



Fonte: Fernando G. Morais

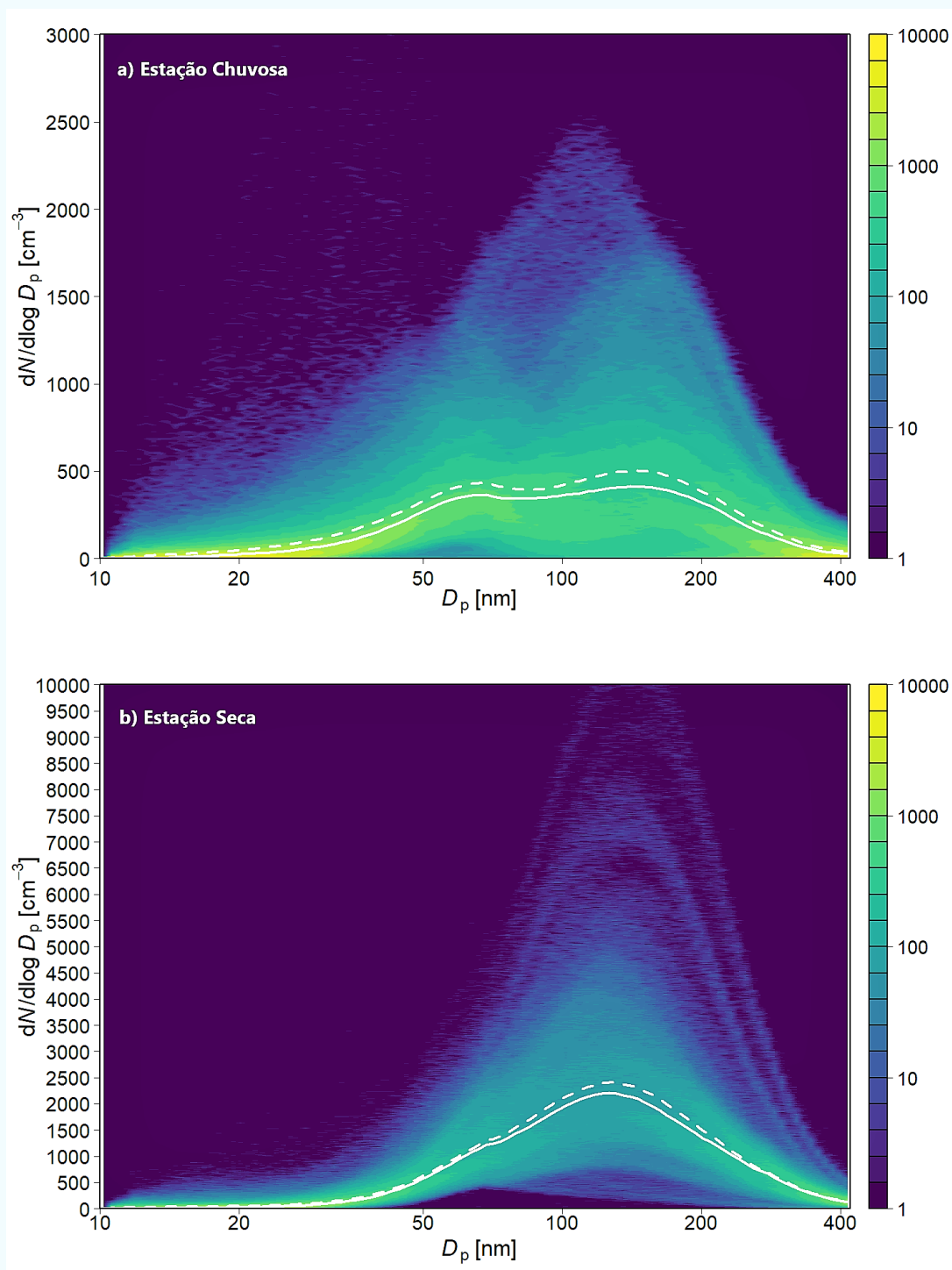
Notamos que a absorção do BrC se correlaciona linearmente com a massa obtida para os aerossóis orgânicos, com um valor alto de R^2 , de forma que, quanto maior a massa de orgânico, maior será a absorção do BrC. É interessante salientar que tal comportamento linear com a massa de orgânicos não é observado com BC.

5.2.6 Diâmetro médio do aerossol

Com objetivo de entender melhor o tipo, a sazonalidade e a influência de transportes de longa distância do aerossol medido no ATTO durante a amostragem dos 34 filtros em 2019, foi analisada a distribuição de tamanho do aerossol utilizando um SMPS da TSI descrito. A Figura 42 mostra o comportamento, tamanhos e a quantidade de aerossol medido no local durante a estação chuvosa, que compreende os meses de fevereiro a maio, e a estação seca, entre agosto e novembro.

As distribuições de tamanho para estação chuvosa e seca representam o mesmo período que foram feitas as medidas consideradas nesta tese.

Figura 42 – a) Distribuição de tamanho para a estação chuvosa no ATTO em 2019, mostrando a moda de nucleação com diâmetro médio em 34 nm, a moda de Aitken em 59 nm e a moda de acumulação em 138 nm. b) Distribuição de tamanho para a estação seca no mesmo local mostrando a moda de Aitken em 59 nm e a moda de acumulação em 128 nm. A linha contínua representa a média, e a linha tracejada a mediana dos dados nos respectivos períodos.



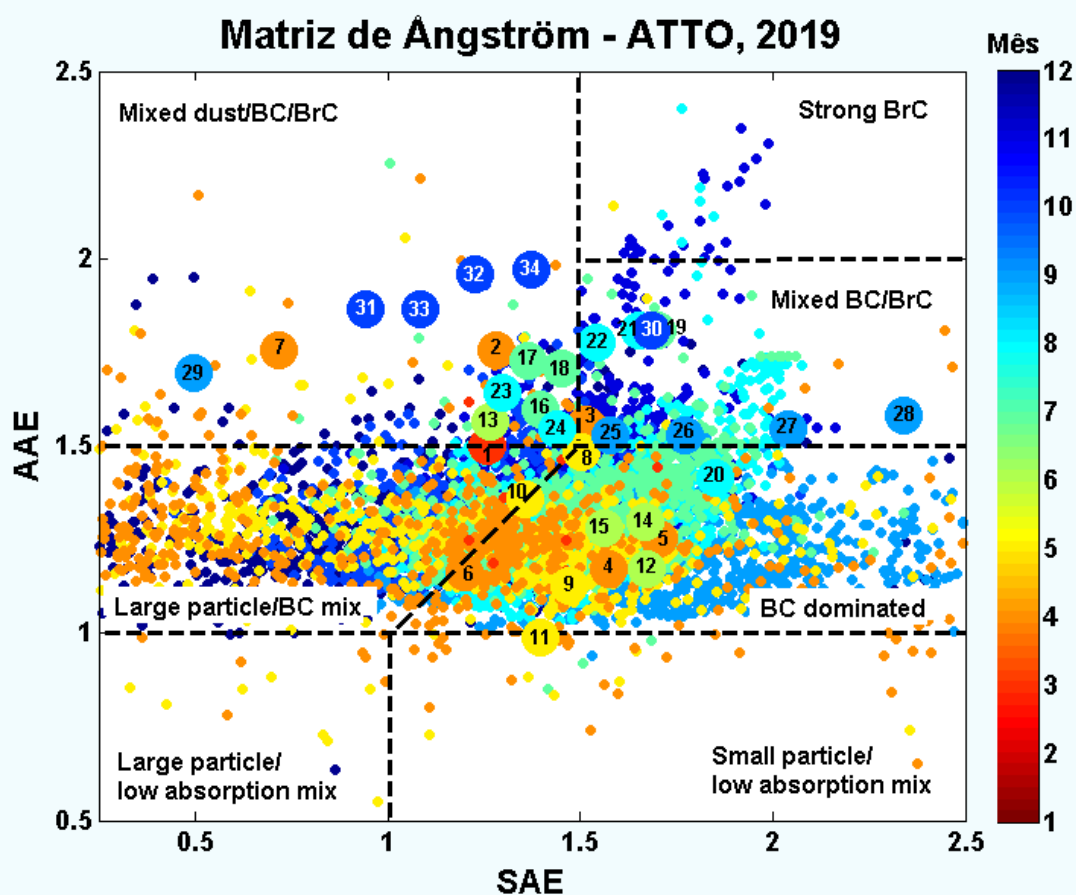
Fonte: Fernando G. Morais e Marco A. Franco

Os resultados mostram a moda de nucleação com diâmetro médio em 34 nm, a moda de Aitken em 59 nm e a moda de acumulação em 138 nm para a estação chuvosa, sendo que, para a estação seca no mesmo local a moda de Aitken em 59 nm e a moda de acumulação em 128 nm. Esses valores concordam com os valores apresentados por FRANCO, M. A. et al. (2021), que realizou um estudo detalhado e minucioso sobre as distribuições de tamanho do aerossol no ATTO no mesmo período.

5.2.7 Matriz de Ångström com medidas *in situ* no ATTO

A série de dados de absorção e espalhamento obtidas por Aetalômetro e Nefelômetro, respectivamente, no sítio do ATTO na Amazônia, nos permite calcular a matrizes de Ångström, combinação do expoente de absorção e o expoente de espalhamento de Ångström (CAZORLA et al., 2013).

Figura 43 – Matriz de Angstrom para os dados coletados *in situ* no ATTO em 2019, utilizando Nefelômetro e Aetalômetro. Os pontos maiores numerados de 1 a 34 representam os períodos de amostragem dos filtros de Nuclepore e as cores estão correlacionadas com os meses do ano.



Fonte: Fernando G. Morais

Aplicamos esta metodologia, analisando a relação entre o AAE vs. SAE e formando a chamada matriz de Ångström, dividida em áreas associadas com diferentes tipos de aerossóis (BAHADUR et al., 2012).

A Figura 43 nos permite observar o comportamento do aerossol no sítio do ATTO em 2019, coletado a 60m de altura, onde podemos perceber a sazonalidade do aerossol bastante marcada por agrupamentos em regiões distintas no gráfico, em função dos meses do ano. As marcações maiores e numeradas representam o período em que amostramos os 34 filtros Nuclepore no local, o que nos permite obter comparações diretas entre os resultados obtidos por diferentes métodos de medida.

Podemos perceber nos meses de março a abril o aerossol composto de partículas grande e BC, com alguns pontos indo para a região de *Dust*. Nos meses de julho a setembro, bastante marcado por BC, justamente no período da estação seca, com influência da queima de biomassa. Ainda entre outubro e novembro, observamos o aerossol como uma mistura de BrC e BC, até fortemente influenciado por BrC.

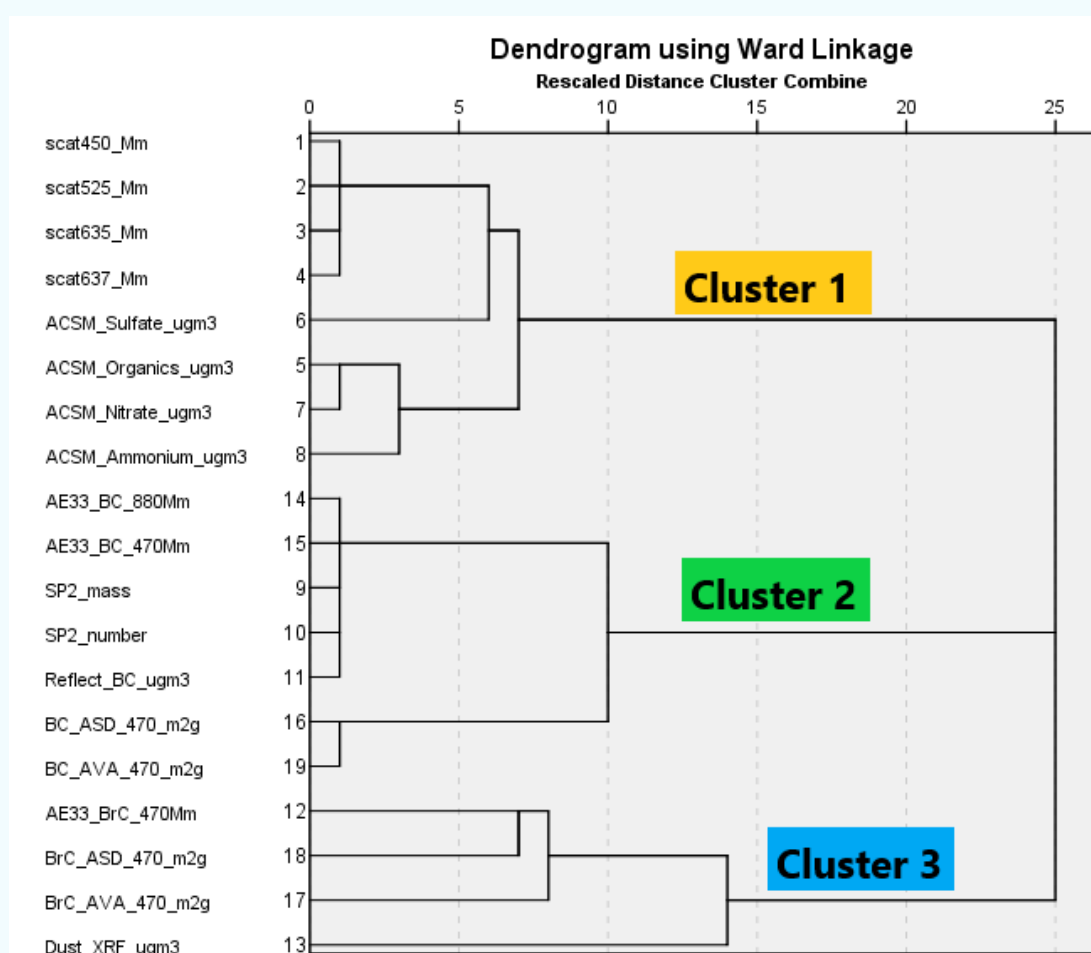
É interessante notar que o filtro 7 apresenta um deslocamento em direção à região no gráfico onde temos *Dust*, o que está de acordo com a análise apresentada na Figura 30, onde podemos observar um pico de *Dust* bem pronunciado. Essa intercomparação nos dados obtidos por diversos métodos simultâneos nos mostra que as análises estão bem robustas e apresentam resultados confiáveis.

5.3 Resultados das análises de Cluster e Fatores para as medidas *in situ*

Com o intuito de verificarmos a robustez, a qualidade e as correlações existentes nos dados, realizamos algumas análises estatísticas multivariadas, como análises de cluster e análises de fatores principais. Um dendrograma é utilizado para visualizar o processo de agrupamento passo a passo, assim como analisar os níveis de distância dos clusters identificados, onde quanto menor a distância, mais fortemente agrupados as variáveis estão. Um bom ponto de decisão de agrupamento é onde os valores de distância mudam consideravelmente. Além disso, deve ser avaliado se os clusters formados fazem sentido científico.

A análise de cluster foi realizada com as medidas *in situ* na torre ATTO, a saber, medidas de absorção, espalhamento e composição química de aerossóis, além das medidas realizadas nos filtros, a saber, refletância, gravimetria, fluorescência de raios-X e espectrometria. Também incluímos as estimativas da massa de BC e BrC pelo Aetalômetro, refletância e o algoritmo do Wang. No caso dos instrumentos *in-situ*, calculamos valores médios correspondentes ao período de aquisição de cada um dos 34 filtros, todos coletados entre março e novembro de 2019.

Figura 44 - Análise de Cluster das variáveis por *Wards error sum*, com dados normalizados.



Fonte: Fernando G. Morais

A Figura 44 mostra o resultado da análise de cluster, onde scat450, scat525, scat635 e scat637 se referem às medidas de espalhamento de aerossóis em 1/Mm. *ACSM_Sulfate*, *ACSM_Organics*, *ACSM_Nitrate* e *ACSM_Ammonium* são medidas em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de composição química de aerossol, obtidas por um Monitor de

especificação química de aerossol. SP2_mass e SP2_number se referem à mediana da distribuição de tamanho do BC medido em massa e número.

AE33_BC_880, AE33_BC_470, AE33_BrC_470 se referem às medidas de absorção para BC em 880nm e BC e BrC em 470 nm em 1/Mm. *Reflect_BC* é o valor de BC em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a partir do refletômetro M43D *Smoke Stain Reflectometer*. As variáveis BC_ASD_470, BrC_ASD_470, BC_AVA_470, BC_AVD_470 são a eficiência de absorção do BC e BrC, medidas em m^2/g através de espectrômetros óticos de alta resolução. Como descrito na seção de metodologia, utilizamos as técnicas descritas por MARTINS et al. (1998), para calcular a eficiência de absorção a partir de refletância e, depois, aplicamos o método descrito por SATURNO et al. (2018); WANG, XUAN et al. (2016) para obter BC e BrC a partir da absorção em 470nm, 660nm e 880nm. O *Dust_XRF* é a porção de *Dust* em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a partir de medidas da composição elementar dos aerossóis com a análise de fluorescência de raio-X dos filtros e aplicando-se o método de MAENHAUT et al. (2005).

A análise de cluster separou as medidas em três grupos principais, correspondentes a espalhamento dos aerossóis, absorção de BC e BrC+*Dust*. A análise de cluster foi bastante sólida, mostrando a robustez da inter-relação entre as variáveis de natureza muito diferentes, obtidas por instrumentos e metodologias de análises completamente distintas. Este resultado nos dá confiança, principalmente nas estimativas da separação entre BC e BrC.

Realizamos também uma análise de fatores principais (PFA) na mesma base de dados (Tabela 2). A PFA analisa a variabilidade da série temporal e reduz o número de variáveis independentes ao menor número estatisticamente significativo, explicando a maior parte da variabilidade dos dados. Observamos que três fatores explicam 92% da variabilidade dos dados. O primeiro fator consiste nas variáveis de espalhamento e a componente de aerossol orgânico secundário (SOA). O segundo fator é associado ao BC. O terceiro fator é associado ao BrC e ao *Dust*. Da mesma forma que na análise de Cluster, o BrC e o BC estão separados em fatores ou grupos diferentes. Os resultados são muito similares à análise de cluster, o que mostra a robustez dos métodos estatísticos empregados.

Tabela 2 - Resultados da Análise de Fatores Principais na base de dados da torre ATTO, com a matriz de fatores, rodada por rotação ortogonal VARIMAX.

	Matriz das componentes rotacionada por VARIMAX		
	Componente		
	1	2	3
scat635_1/Mm	.850	.450	.199
scat637_1/Mm	.837	.476	.206
scat450_1/Mm	.836	.465	.273
scat525_1/Mm	.830	.483	.256
ACSM_Nitrate_μg/m ³	.765	.457	.408
ACSM_Organics_μg/m ³	.754	.470	.408
ACSM_Ammonium_μg/m ³	.718	.542	.302
BrC_AVA_470_m ² /g	.612	.270	.585
BC_AVA_470_m ² /g	.469	.812	.215
BC_ASD_470_m ² /g	.410	.798	.280
AE33_BC_880_1/Mm	.422	.783	.422
SP2_mass	.461	.779	.383
AE33_BC_470+1/Mm	.451	.778	.401
Reflect_BC_μg/m ³	.464	.776	.405
SP2_number	.523	.724	.400
ACSM_Sulfate_μg/m ³	.622	.680	.218
Dust_XRF_μg/m ³	.124	.307	.878
AE33_BrC_470_1/Mm	.564	.355	.641
BrC_ASD_470_m ² /g	.550	.481	.572

Fonte: Fernando G. Morais

5.4 Resultados da estimativa da forçante radiativa direta dos aerossóis na Amazônia

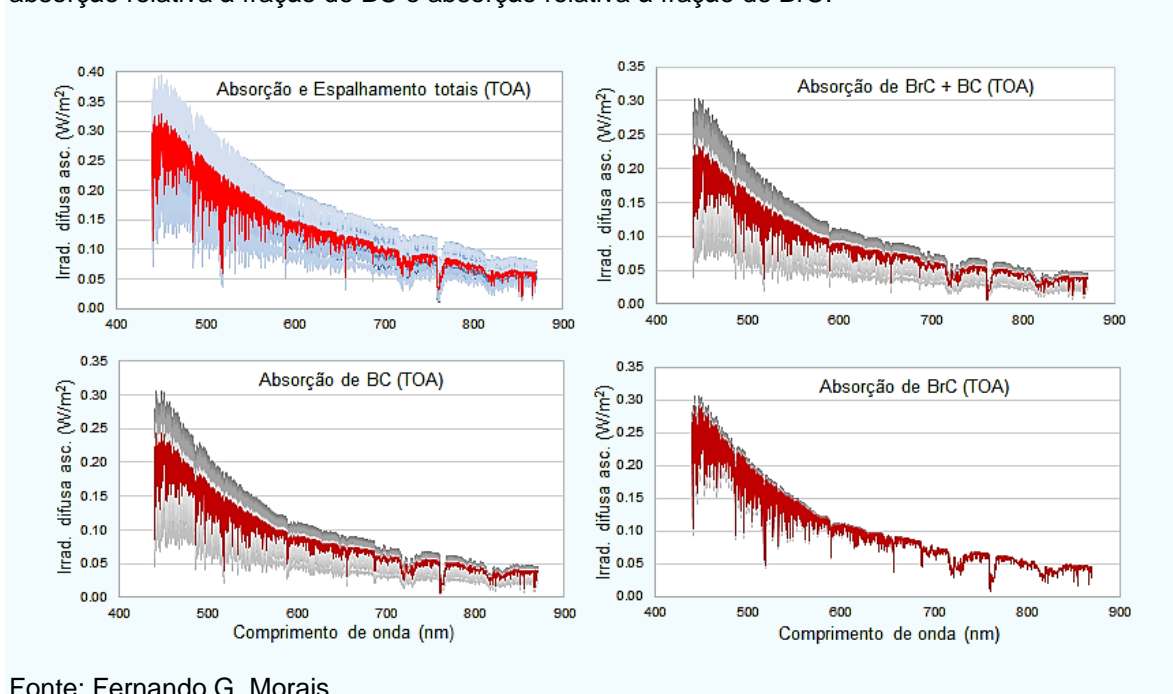
A estimativa da forçante radiativa dos aerossóis é de extrema importância para os estudos relacionados ao efeito dos aerossóis na atmosfera terrestre, incluindo este, pois o equilíbrio radiativo do sistema Terra-atmosfera pode ser perturbado por diversos fatores, que podem ser tanto naturais quanto antrópicos (BOUCHER, 2015; PALÁCIOS, 2017).

Utilizando o programa LibRadtran e os dados de absorção, espalhamento e sensoriamento remoto de fotômetros no sítio do ATTO em 2019, foi possível fazer uma estimativa da forçante radiativa direta dos aerossóis neste período, conforme descrito no capítulo 4 desta tese, em Metodologia, item 8: Estimativa da forçante radiativa direta de aerossóis carbonáceos.

De acordo com a definição adotada no Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), a forçante radiativa é definida como a diferença na irradiância líquida na tropopausa, entre um estado de referência e um estado perturbado por um agente climático externo. Desta forma, calculamos a irradiância difusa ascendente no topo da atmosfera em W/m^2 , considerando quatro condições diferentes, que são denominadas como absorção e espalhamentos totais para o posterior cálculo da forçante radiativa total, e três condições em que se levou em conta apenas a fração absorvedora dos aerossóis, sendo absorção de BrC e BC, absorção apenas de BC e absorção apenas de BrC.

A Figura 45 mostra a irradiância difusa ascendente no topo da atmosfera de forma espectral para SZA 0° , considerando albedo de superfície florestal, a qual permite avaliar a irradiância em função do comprimento de onda, onde as linhas em vermelho se referem aos valores médios obtidos.

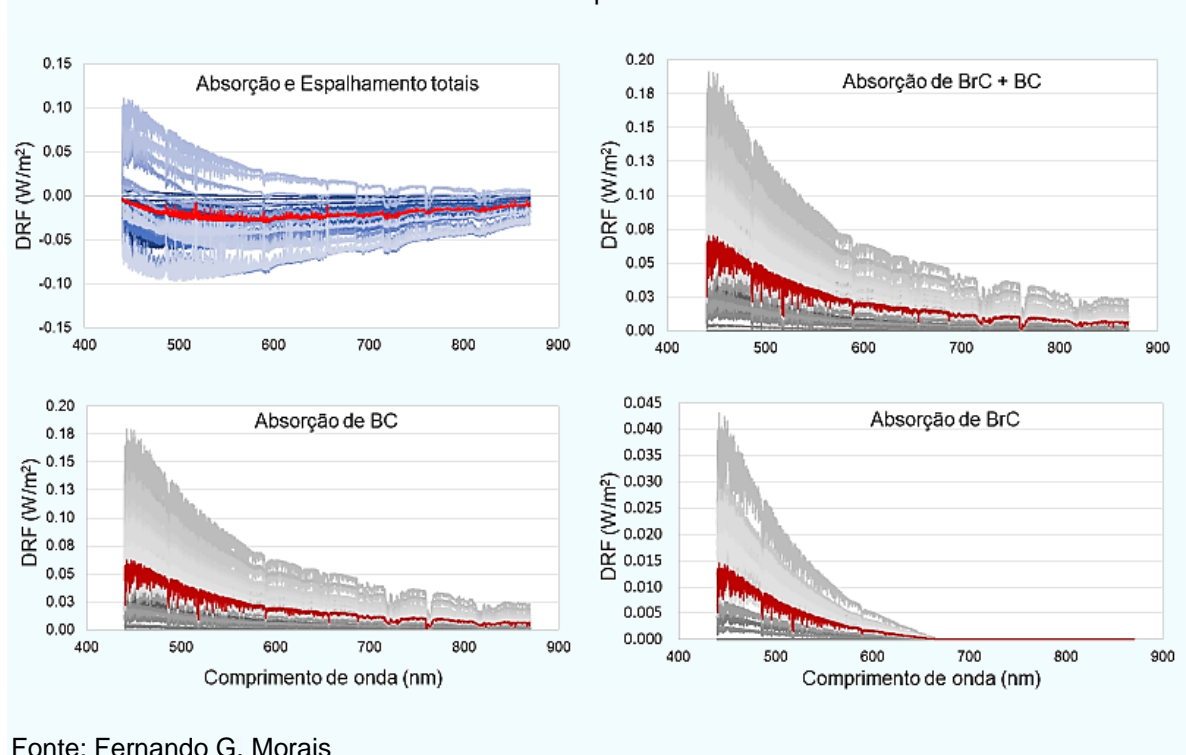
Figura 45 – Irradiância difusa ascendente no topo da atmosfera, considerando absorção e espalhamento e levando em conta apenas a fração absorvedora como a absorção total (BrC+BC), absorção relativa à fração de BC e absorção relativa à fração de BrC.



O IPCC adota o início da revolução industrial (FORSTER *et al.*, 2007) para o estado de referência no cálculo da forçante radiativa global. Neste trabalho, adotamos o filtro número 6 de 34 amostrados como a referência de condições pristinas, pois foi amostrado num período considerado limpo e praticamente sem interferências externas e apresentando os menores coeficientes de absorção e espalhamento. De forma geral, as forçantes radiativas positivas indicam um efeito líquido de aquecimento do sistema Terra-atmosfera enquanto as forçantes negativas indicam efeitos de resfriamento.

A Figura 46 apresenta a forçante radiativa dos aerossóis de forma espectral para SZA 0°, em relação a um filtro coletado na estação chuvosa, conforme explicado anteriormente, e daqui em diante sempre que falarmos em DRF será considerado como o estado de referência os valores obtidos no filtro 6.

Figura 46 – Forçante radiativa dos aerossóis (DRF) considerando absorção e espalhamento em azul. Além disso, em cinza, levando em conta apenas a fração absorvedora como a absorção total (BrC+BC), absorção relativa à fração de BC e absorção relativa à fração de BrC. As linhas em vermelho se referem aos valores médios obtidos para os 34 filtros.

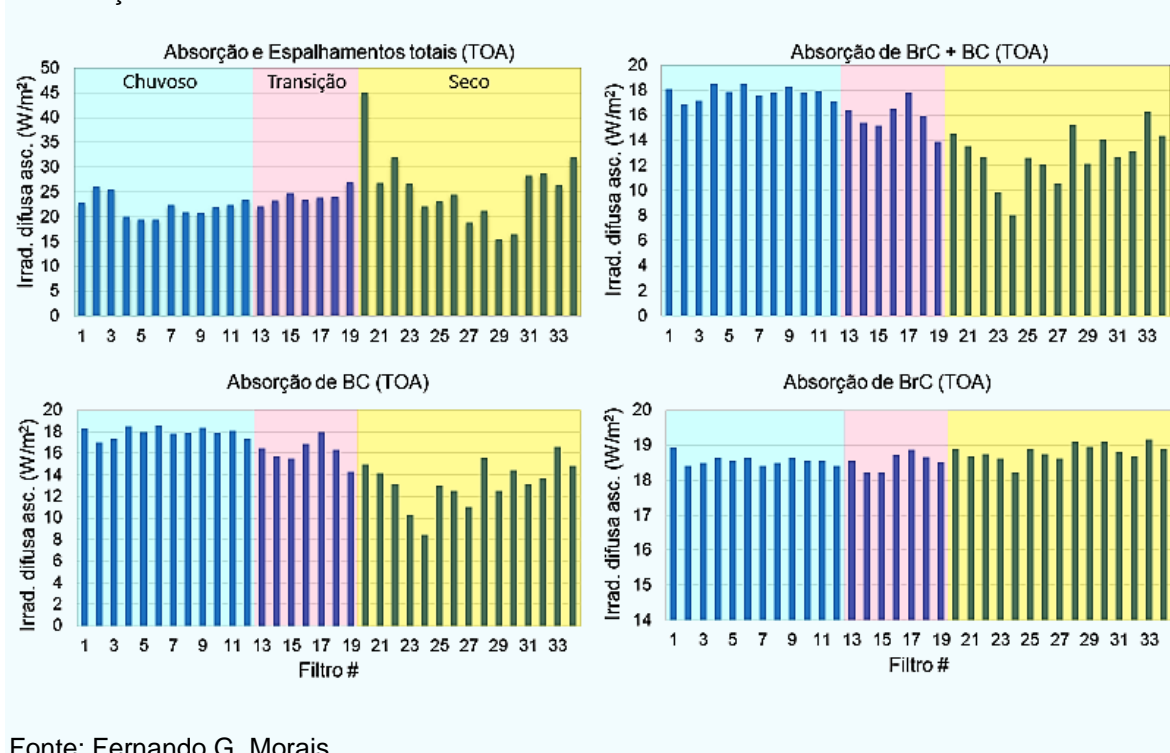


É interessante notar o comportamento da DRF em função do comprimento de onda, onde para absorção e espalhamentos totais, gráfico em tons de azul, podemos observar períodos com DRF positivo (de aquecimento) e períodos com DRF negativo (de resfriamento), porém em média tem um valor negativo.

A DRF considerando apenas a fração absorvedora, gráficos em tons de cinza, é sempre positiva para todos os comprimentos de onda estudados. A DRF considerando apenas o efeito de absorção do BrC varia de 440 a 660 nm.

A irradiância difusa no topo da atmosfera em W/m^2 foi avaliada em função das estações chuvosas, de transição e seca para as quatro condições descritas previamente.

Figura 47 – Irradiância difusa ascendente no topo da atmosfera, em função das estações chuvosa, de transição e seca.



Fonte: Fernando G. Morais

A irradiância difusa ascendente no topo da atmosfera considerando absorção e espalhamentos totais em média foi de $24 W/m^2$, sendo que, excepcionalmente no caso do filtro 20 este valor foi de $45 W/m^2$, pois se tratou de um período com aerossóis fortemente espalhadores.

A absorção total (BrC + BC) e a absorção de BC apresentam menores irradiâncias difusas no topo da atmosfera na estação seca, o que coincide com o período de transportes e queima de biomassa na região amazônica, de modo que o aerossol é mais absorvedor fazendo com que menos irradiância seja refletida no TOA.

O efeito médio da absorção de BrC é de aproximadamente 23% da irradiância difusa ascendente no TOA de absorção total. Isto é bastante coerente

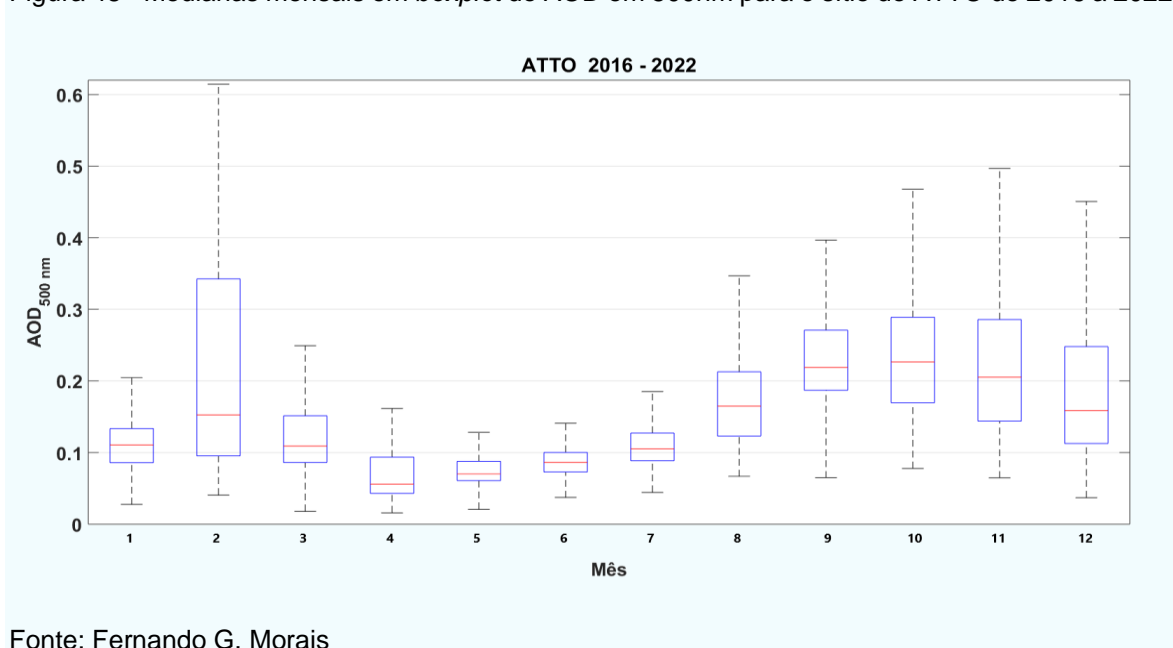
com os cálculos anteriores apresentados na Figura 24, onde a fração de BrC para o AAOD total em 440nm no ATTO foi de aproximadamente 25%.

Os cálculos e estimativas da DRF e irradiância difusa no TOA foram todos feitos considerando SZA 0°, porém, para uma melhor comparação dos resultados com a literatura existente, fez-se necessário calcular médias diárias, considerando diversos SZA para a região amazônica.

A irradiância difusa ascendente no topo da atmosfera foi calculada em função da hora do dia, para 3 dias diferentes: 15/04/2015, 01/07/2015, 15/09/2015. Essas datas correspondem, aproximadamente, a meados da estação úmida, da estação de transição e da estação seca. Em cada dia, essa irradiância foi calculada entre 06:00 e 18:00 hora local, em intervalos de 10 minutos e com profundidade ótica de aerossóis variando entre 0.0 e 1.0, em intervalos de 0.1.

Os fatores corrigidos para cada dia, em função do AOD, são muito semelhantes numericamente. Por fim, calcula-se um fator corrigido médio, em função do AOD, para cada filtro. O resultado é um fator multiplicativo, a ser aplicado sobre os fluxos ascendentes obtidos anteriormente, que depende do AOD observado em cada dia. A Figura 48 apresenta um gráfico em *boxplot* para os valores obtidos do AOD em 500nm para o ATTO, desde 2016.

Figura 48 - Medianas mensais em *boxplot* do AOD em 500nm para o sítio do ATTO de 2016 a 2022.

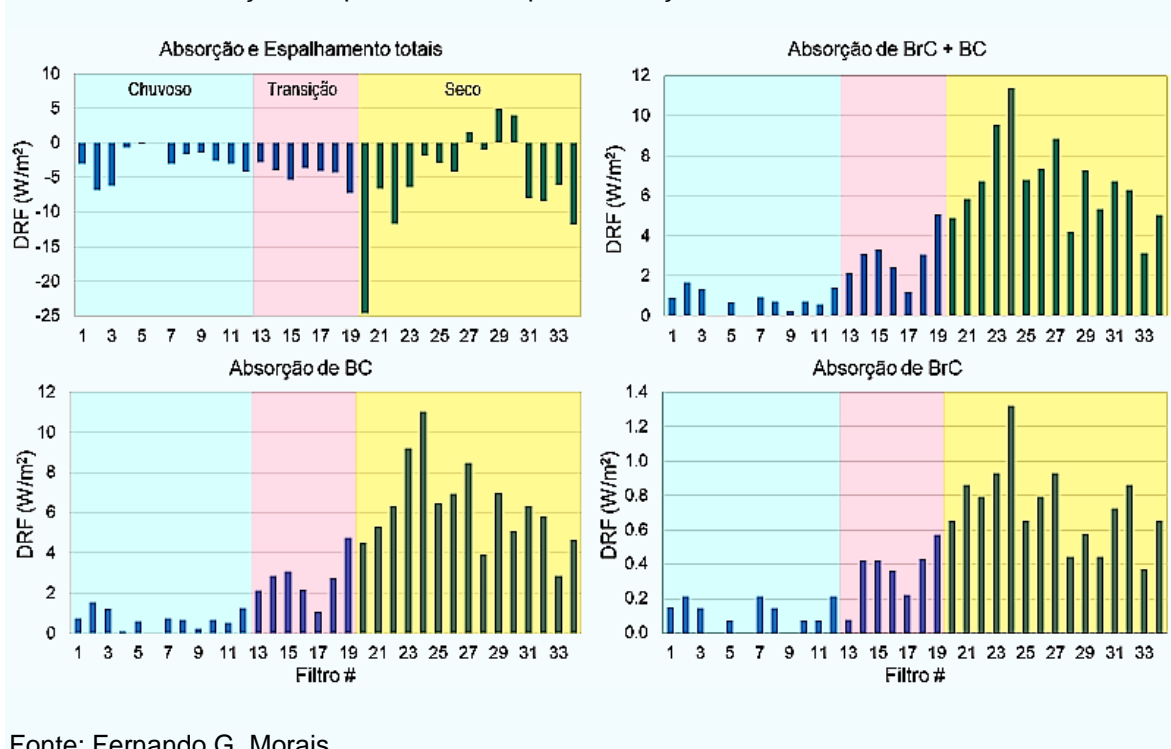


Fonte: Fernando G. Morais

Utilizamos o valor mediano correspondente ao período de coleta dos filtros, pois, como as medidas de AOD de fotômetro dependem muito das condições climáticas, nuvens e chuvas interferem nas medidas.

Aplicando as correções citadas, obtivemos a DRF para as médias diárias de cada filtro, a qual pode ser observada na Figura 49.

Figura 49 – Variação sazonal da média diária das forçantes radiativas diretas dos aerossóis, considerando absorção e espalhamento e apenas a fração absorvedora.



Fonte: Fernando G. Morais

A DRF para a absorção e espalhamento totais obtida foi em média -4.28 W/m^2 , sendo para o período chuvoso -2.66 W/m^2 , transição -4.43 W/m^2 e para o período seco -5.50 W/m^2 . Os valores obtidos são compatíveis com os alcançados previamente por SENA et al. (2013), na qual reportou -5.60 W/m^2 durante o período seco na Amazônia, utilizando técnicas diferentes e medidas de satélite.

Os filtros 27, 29 e 30 foram os únicos que apresentaram uma DRF positiva devido ao fato de o aerossol neste período ser fortemente absorvedor, correspondente ao período de seca e forte queima de biomassa.

Ao avaliarmos apenas a fração absorvedora, obtivemos para a absorção total (BrC + BC) uma DRF diária média de $+3.77 \text{ W/m}^2$, sendo $+0.75 \text{ W/m}^2$, $+2.89 \text{ W/m}^2$ e $+6.61 \text{ W/m}^2$, para os períodos chuvoso, transição e seco, respectivamente.

Para a absorção apenas relativa ao BC, obtivemos uma DRF diária média de $+3.54 \text{ W/m}^2$, sendo $+0.68 \text{ W/m}^2$, $+2.67 \text{ W/m}^2$ e $+6.15 \text{ W/m}^2$, para os períodos chuvoso, transição e seco, respectivamente. A média global da DRF obtida por BOND, T. C. et al. (2013) foi $+1.1 \text{ W/m}^2$.

Estudos prévios (BROWN et al., 2018; FENG et al., 2013; JO et al., 2016; SALEH et al., 2015; WANG, X. et al., 2014; ZHANG, A. et al., 2019) estimaram a DRF global relativa apenas a absorção de BrC entre 0.04 e 0.22 W/m^2 . Neste estudo, obtivemos uma DRF diária média para o BrC de $+0.43 \text{ W/m}^2$, sendo $+0.11 \text{ W/m}^2$, $+0.36 \text{ W/m}^2$ e $+0.73 \text{ W/m}^2$, para os períodos chuvoso, transição e seco, respectivamente, correspondendo em média a 11.4% da DRF de absorção total e a 16% da DRF total em módulo.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho desenvolveu um método de obtenção e análise do expoente de Ångström de absorção em aerossóis, que expressa a dependência da absorção com o comprimento de onda da radiação. Este novo método permite observar uma variedade de propriedades de BC e BrC relevantes atmosféricamente e que antes eram desconsideradas ao assumir um valor de índice de refração e propriedades óticas independente do comprimento de onda. Aplicamos este método utilizando sensoriamento remoto através de fotômetros solares em várias localidades na Amazônia, onde observamos que a porcentagem de BrC em relação ao AAOD total no arco do desatamento foi de 12%, e no ATTO, considerado um sítio com pouquíssima interferência antropogênica, o BrC foi de 25%, ambos para o comprimento de onda de 440 nm, com dados de fotômetro na coluna atmosférica. As análises com medidas *in situ* na torre ATTO com filtros Nuclepore, PM_{2.5} em larga faixa espectral (300 a 2500 nm) com espectrômetros óticos de alta resolução, nos proporcionaram entender o comportamento do BrC em função do comprimento de onda.

As matrizes de Ångström apresentadas na Figura 25 e na Figura 26 mostraram o comportamento sazonal das propriedades óticas do aerossol na Amazônia, nos permitindo observar períodos característicos com maior influência de BC, BrC e *Dust*. Ao analisarmos as matrizes de Ångström calculadas através de dados de fotômetros da rede AERONET, notamos um comportamento similar nos sítios de Alta Floresta (MT), Ji-Paraná (RO), Rio Branco (AC) e Cuiabá (MT), onde os meses de agosto a novembro compreendem a época da estação seca e de maior índice de queimadas, onde o BC é dominante nesses sítios analisados e os resultados apresentados são coerentes entre si.

Para os sítios de medidas do ATTO e Manaus EMBRAPA, as matrizes de Ångström além de mostrar BC dominante nos meses de agosto a novembro (estação seca), também nos mostram a existência de *Dust* e uma mistura de *Dust*/BC/BrC nos meses de janeiro a abril, que correspondem ao período de chegada de *Dust* proveniente do norte da África, período este que está de acordo com a literatura existente (HOLANDA et al., 2019; MORAN-ZULOAGA et al., 2018; PÖHLKER, C. et al., 2019; PÖHLKER, M. L. et al., 2016)

Usando o método desenvolvido para obter e analisar a variabilidade espectral da absorção de aerossóis, foi possível observar uma variedade de propriedades atmosféricas relevantes de BC e BrC. Em particular, foi possível perceber que assumir um índice de refração independente do comprimento de onda e valor das propriedades óticas não consegue explicar a dependência espectral da absorção. Análises com medições *in situ* na torre ATTO utilizando filtros Nuclepore, coletados para a faixa de tamanho de PM_{2.5} em uma ampla faixa de comprimento de onda (350 a 2500 nm), com espectrômetros óticos de alta resolução, permitiram entender melhor o comportamento do BrC em função do comprimento de onda.

Os resultados mostram que a absorção de BrC é significativa para comprimentos de onda abaixo de 660 nm e é máxima em comprimentos de onda próximos a 350 nm. Isso é apoiado por medições de laboratório de outros tipos de aerossóis (CHEN; BOND, 2010; KIRCHSTETTER et al., 2004; YANG et al., 2009; ZHANG, X. et al., 2013).

A fração média de BrC em relação à absorção total em 470 nm para os espectrômetros óticos ASD e AVA integrados foi de 15,9%, sendo que 85.1% da absorção total é associada ao BC. Os mesmos cálculos foram repetidos com dados obtidos paralelamente por Aetalômetros, onde obtivemos em média 14.9% para BrC. Isso significa que a absorção de radiação por BrC é uma componente importante nos aerossóis da Amazônia Central.

Os dados *in situ* obtidos por meio de Aetalômetros nos permitiram observar uma maior porcentagem de BrC em relação ao BC para a estação chuvosa, e isso faz sentido pois praticamente não temos transporte significativo de BC de longas distâncias por conta da deposição úmida. Porém, no período seco, a quantidade de BC é muito maior do que a de BrC em porcentagem, principalmente devido ao efeito da queima de biomassa transportada. Além disso, observamos que, para a estação chuvosa, temos uma média de aproximadamente 21% de BrC em relação à absorção total do aerossol, enquanto para a estação de transição e seca, respectivamente, uma média de 17% e 11% de BrC.

O refletômetro ótico M43D *Smoke Stain* é um instrumento relativamente simples de ser utilizado e pode fornecer dados interessantes e de forma rápida de BC depositado em filtros a partir de uma calibração com uma equação simples (Eq.

4.4). Através de uma comparação entre a medida de referência de BC obtido pelo SP2 e a medida indireta de BC pelo refletômetro M43D, obtivemos um fator de correção ($y = 0.57 \cdot x$) que nos permite, a partir de então, obter dados de BC da Amazônia diretamente de filtros utilizando o refletômetro ótico M43D com mais acurácia e segurança.

Análises de partículas de aerossóis por MEV aliado à técnica de EDS nos permitiu avaliar a origem e forma dos aerossóis coletados nos filtros de Nuclepore, nos dando garantias de que a amostragem de filtros foi bem-sucedida. Além disso, proporcionou uma análise quantitativa das frações de silício, alumínio, potássio, cálcio e ferro contidas nas amostras.

As análises químicas por FRX proporcionaram uma melhor compreensão dos componentes químicos presentes na amostra. A partir destas medidas, várias abordagens podem ser usadas para obter a concentração de *Dust*.

Com o intuito de verificarmos a robustez, a qualidade e as correlações existentes nos dados, realizamos algumas análises estatísticas multivariadas, como análises de cluster e análises de fatores principais, onde tais estudos mostraram que os dados de grandezas similares obtidos por técnicas completamente diferentes se agruparam corretamente, nos dando muita confiança em utilizar os dados, garantindo que foram muito bem amostrados e apresentaram grande coerência.

Utilizando o programa LibRadtran e os dados de absorção, espalhamento e sensoriamento remoto de fotômetros (função de fase) no sítio do ATTO em 2019, foi possível fazer uma estimativa da forçante radiativa direta dos aerossóis neste período, além de obter o valor da DRF em função do comprimento de onda no espectro visível.

A DRF para a absorção e espalhamento totais obtida foi em média -4.28 W/m^2 , sendo para o período chuvoso -2.66 W/m^2 , transição -4.43 W/m^2 e para o período seco -5.50 W/m^2 . Os valores obtidos são compatíveis com os alcançados previamente por SENA et al. (2013), na qual reportou -5.60 W/m^2 durante o período seco na Amazônia, utilizando técnicas diferentes e medidas de satélite. Este valor pode ser comparado com o aquecimento global associado ao aumento da

concentração de CO₂, que é de cerca de +2 W/m². O efeito de resfriamento dos aerossóis é muito significativo.

Ao avaliarmos apenas a fração absorvedora dos aerossóis, obtivemos para a absorção total (BrC + BC) uma DRF diária média de +3.77 W/m², sendo +0.75 W/m², +2.89 W/m² e +6.61 W/m², para os períodos chuvoso, transição e seco, respectivamente.

Para a absorção apenas relativa ao BC, obtivemos uma DRF diária média de +3.54 W/m², sendo +0.68 W/m², +2.67 W/m² e +6.15 W/m², para os períodos chuvoso, transição e seco, respectivamente. A média global da DRF obtida por BOND, T. C. et al. (2013) foi +1.1 W/m².

Estudos prévios (BROWN et al., 2018; FENG et al., 2013; JO et al., 2016; SALEH et al., 2015; WANG, X. et al., 2014; ZHANG, A. et al., 2019) estimaram a DRF global relativa apenas à absorção de BrC entre 0.04 e 0.22 W/m². Neste estudo, obtivemos uma DRF diária média para o BrC de +0.43 W/m², sendo +0.11 W/m², +0.36 W/m² e +0.73 W/m², para os períodos chuvoso, transição e seco, respectivamente, correspondendo em média a 11.4% da DRF de absorção total e a 16% da DRF total em módulo. Os valores mais altos que obtivemos estão associados à particular carga de aerossóis na Amazônia, que é maior do que áreas remotas marinhas, levadas em conta no cálculo global.

Através deste estudo, foi possível analisar a consistência dos diferentes métodos para quantificar o papel do BrC e do BC na absorção de radiação por aerossóis e caracterizar os mecanismos que influenciam o papel de BrC na Amazônia para as várias fontes de partículas (queimadas, poeira do Saara, emissões locais) e suas sazonalidades, conforme pode ser observado nas matrizes de Ångström. A síntese destas análises permite entender melhor o papel das emissões da floresta Amazônia nas mudanças climáticas. O estudo do impacto das diferentes fontes de aerossóis contribuirá para ampliar o entendimento dos efeitos na Amazônia para outras florestas tropicais do planeta.

6.1 Perspectivas Futuras

Como trabalhos futuros, pretendemos elaborar um artigo relatando especificamente a quantificação do BrC na Amazônia levando em conta a sua sazonalidade e, dessa forma, caracterizar o BrC no arco do desmatamento e em sítio de floresta primária (ATTO), permitindo explicitar os efeitos dos diferentes mecanismos que controlam a formação de BrC na Amazônia. Também pretendemos escrever um segundo artigo explorando a estimativa da DRF na Amazônia, levando em conta as frações absorvedoras de BC e BrC. Como a Amazônia é uma região muito extensa e sensoriamento remoto é uma técnica importante para a região, será possível obter BC e BrC a partir de dados de AAOD em dados de satélite (sensor AURA, por exemplo) e expandir a análise de dados e resultados para amplas áreas da Amazônia. Desejamos ainda continuar as análises de filtros, processando cerca de 40 filtros de Teflon, na fração PM₁₀ e 34 filtros PM_{2.5} coletados em paralelo com os 34 filtros Nuclepore PM_{2.5} analisados neste estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALEXANDER, D. T. L.; CROZIER, P. A.; ANDERSON, J. R. Brown Carbon Spheres in East Asian Outflow and Their Optical Properties. **Science**, v. 321, n. 5890, p. 833–836, 8 ago. 2008.

ANDERSON, G. P.; CLOUGH, S. A.; KNEIZYS, F.; CHETWYND, J. H.; SHETTLE, E. P. **AFGL atmospheric constituent profiles (0.120 km)**. [S.l.]: Air Force Geophysics Lab Hanscom AFB MA, 1986.

ANDRADE, M. de F. **Identificação de Fontes da Matéria Particulada do Aerossol Atmosférico De São Paulo**. 1993. Doutorado em Física Nuclear – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/43/43131/tde-01072013-164055/>. Acesso em: 10 jan. 2022.

ANDRADE, M. de F.; DE MIRANDA, R. M.; FORNARO, A.; KERR, A.; OYAMA, B.; DE ANDRE, P. A.; SALDIVA, P. Vehicle emissions and PM_{2.5} mass concentrations in six Brazilian cities. **Air Quality, Atmosphere & Health**, v. 5, n. 1, p. 79–88, mar. 2012.

ANDREAE, M. O.; GELENCSEER, A. Black carbon or brown carbon? The nature of light-absorbing carbonaceous aerosols. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 6, n. 10, p. 3131–3148, 28 jul. 2006.

ARANA, A. **Aerossóis Atmosféricos na Amazônia: Composição elementar orgânica e inorgânica em regiões com diferentes usos do solo**. 2014. Tese (Doutorado em Clima e Ambiente) – Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2014.

ARANA, Andréa; LOUREIRO, A. L.; BARBOSA, H. M. J.; VAN GRIEKEN, R.; ARTAXO, P. Optimized energy dispersive X-ray fluorescence analysis of atmospheric aerosols collected at pristine and perturbed Amazon Basin sites:

Optimized EDXRF analysis of atmospheric aerosols in the Amazon Basin. *X-Ray Spectrometry*, v. 43, n. 4, p. 228–237, jul. 2014.

AROLA, A.; SCHUSTER, G.; MYHRE, G.; KAZADZIS, S.; DEY, S.; TRIPATHI, S. N. Inferring absorbing organic carbon content from AERONET data. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 11, n. 1, p. 215–225, 11 jan. 2011.

ARTAXO NETTO, P. E. *Modelos receptores aplicados a determinação da estrutura de fontes de aerossóis remotos*. 1985. Doutorado em Física Nuclear – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1985. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/43/43131/tde-02072012-150232/>. Acesso em: 10 jan. 2022.

ARTAXO, P.; RIZZO, L. V.; BRITO, J. F.; BARBOSA, H. M. J.; ARANA, A.; SENA, E. T.; CIRINO, G. G.; BASTOS, W.; MARTIN, S. T.; ANDREAE, M. O. Atmospheric aerosols in Amazonia and land use change: from natural biogenic to biomass burning conditions. *Faraday Discussions*, v. 165, p. 203, 2013.

BAHADUR, R.; PRAVEEN, P. S.; XU, Y.; RAMANATHAN, V. Solar absorption by elemental and brown carbon determined from spectral observations. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 109, n. 43, p. 17366–17371, 23 out. 2012.

BOHREN, C. F.; HUFFMAN, D. R. *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*. 1. ed., [S.l.]: Wiley, 1998. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9783527618156>. Acesso em: 28 out. 2021.

BOND, T. C.; DOHERTY, S. J.; FAHEY, D. W.; FORSTER, P. M.; BERNTSEN, T.; DEANGELO, B. J.; FLANNER, M. G.; GHAN, S.; KÄRCHER, B.; KOCH, D.; KINNE, S.; KONDO, Y.; QUINN, P. K.; SAROFIM, M. C.; SCHULTZ, M. G.; SCHULZ, M.; VENKATARAMAN, C.; ZHANG, H.; ZHANG, S.; BELLOUIN, N.; GUTTIKUNDA, S. K.; HOPKE, P. K.; JACOBSON, M. Z.; KAISER, J. W.; KLIMONT, Z.; LOHMANN,

U.; SCHWARZ, J. P.; SHINDELL, D.; STORELVMO, T.; WARREN, S. G.; ZENDER, C. S. Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment: BLACK CARBON IN THE CLIMATE SYSTEM. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 118, n. 11, p. 5380–5552, 16 jun. 2013.

BOND, Tami C.; BERGSTROM, R. W. Light Absorption by Carbonaceous Particles: An Investigative Review. *Aerosol Science and Technology*, v. 40, n. 1, p. 27–67, 1 jan. 2006.

BOUCHER, O. *Atmospheric Aerosols*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2015. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-94-017-9649-1>. Acesso em: 22 jun. 2021.

BROWN, H.; LIU, X.; FENG, Y.; JIANG, Y.; WU, M.; LU, Z.; WU, C.; MURPHY, S.; POKHREL, R. Radiative effect and climate impacts of brown carbon with the Community Atmosphere Model (CAM5). *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 18, n. 24, p. 17745–17768, 14 dez. 2018.

BURGER, A. A. *Composição do aerossol atmosférico na Amazônia com influência antropogênica: estudo de caso no experimento GoAmazon*. 2018. Mestrado em Física – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/43/43134/tde-26032018-153451/>. Acesso em: 10 jan. 2022.

CAPPA, C. D.; KOLESAR, K. R.; ZHANG, X.; ATKINSON, D. B.; PEKOUR, M. S.; ZAVERI, R. A.; ZELENYUK, A.; ZHANG, Q. Understanding the optical properties of ambient sub- and supermicron particulate matter: results from the CARES 2010 field study in northern California. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 16, n. 10, p. 6511–6535, 27 maio. 2016.

CARRERO, G. C.; FEARNside, P. M.; DO VALLE, D. R.; DE SOUZA ALVES, C. Deforestation Trajectories on a Development Frontier in the Brazilian Amazon: 35

Years of Settlement Colonization, Policy and Economic Shifts, and Land Accumulation. *Environmental Management*, v. 66, n. 6, p. 966–984, dez. 2020.

CASTANHO, A. D. de A. *A Determinação Quantitativa de Fontes de Material Particulado na Atmosfera da Cidade de São Paulo*. 1999. Mestrado em Física Nuclear – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/43/43131/tde-19122003-145359/>. Acesso em: 03 dez. 2021.

CAZORLA, A.; BAHADUR, R.; SUSKI, K. J.; CAHILL, J. F.; CHAND, D.; SCHMID, B.; RAMANATHAN, V.; PRATHER, K. A. Relating aerosol absorption due to soot, organic carbon, and dust to emission sources determined from in-situ chemical measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 13, n. 18, p. 9337–9350, 17 set. 2013.

CHAKRABARTY, R. K.; MOOSMÜLLER, H.; CHEN, L.-W. A.; LEWIS, K.; ARNOTT, W. P.; MAZZOLENI, C.; DUBEY, M. K.; WOLD, C. E.; HAO, W. M.; KREIDENWEIS, S. M. Brown carbon in tar balls from smoldering biomass combustion. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 10, n. 13, p. 6363–6370, 13 jul. 2010.

CHAKRABARTY, Rajan K.; PERVEZ, S.; CHOW, J. C.; WATSON, J. G.; DEWANGAN, S.; ROBLES, J.; TIAN, G. Funeral Pyres in South Asia: Brown Carbon Aerosol Emissions and Climate Impacts. *Environmental Science & Technology Letters*, v. 1, n. 1, p. 44–48, 14 jan. 2014.

CHAN, Y. C.; SIMPSON, R. W.; MCTAINSH, G. H.; VOWLES, P. D.; COHEN, D. D.; BAILEY, G. M. Characterisation of chemical species in PM_{2.5} and PM₁₀ aerosols in Brisbane, Australia. *Atmospheric Environment*, v. 31, n. 22, p. 3773–3785, nov. 1997.

CHANGE, I. P. on C. *Climate Change 2013: the Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. Disponível em:

<http://public.ebib.com/choice/publicfullrecord.aspx?p=3563440>. Acesso em: 12 jun. 2019.

CHEN, Y.; BOND, T. C. Light absorption by organic carbon from wood combustion. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 10, n. 4, p. 1773–1787, 16 fev. 2010.

CHOW, J. C.; WANG, X.; SUMLIN, B. J.; GRONSTAL, S. B.; CHEN, L.-W. A.; TRIMBLE, D. L.; WATSON, J. G.; KOHL, S. D.; MAYORGA, S. R.; RIGGIO, G.; HURBAIN, P. R.; JOHNSON, M.; ZIMMERMANN, R. Optical Calibration and Equivalence of a Multiwavelength Thermal/Optical Carbon Analyzer. *Aerosol and Air Quality Research*, v. 15, n. 4, p. 1145–1159, 2015.

CHUNG, C. E.; RAMANATHAN, V.; DECREMER, D. Observationally constrained estimates of carbonaceous aerosol radiative forcing. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 109, n. 29, p. 11624–11629, 17 jul. 2012.

CLARKE, A. D.; NOONE, K. J.; HEINTZENBERG, J.; WARREN, S. G.; COVERT, D. S. Aerosol light absorption measurement techniques: Analysis and intercomparisons. *Atmospheric Environment (1967)*, v. 21, n. 6, p. 1455–1465, jan. 1967.

DRINOVEC, L.; MOČNIK, G.; ZOTTER, P.; PRÉVÔT, A. S. H.; RUCKSTUHL, C.; COZ, E.; RUPAKHETI, M.; SCIARE, J.; MÜLLER, T.; WIEDENSOHLER, A.; HANSEN, A. D. A. The “dual-spot” Aethalometer: an improved measurement of aerosol black carbon with real-time loading compensation. *Atmospheric Measurement Techniques*, v. 8, n. 5, p. 1965–1979, 6 maio. 2015.

FENG, Y.; RAMANATHAN, V.; KOTAMARTHI, V. R. Brown carbon: a significant atmospheric absorber of solar radiation? *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 13, n. 17, p. 8607–8621, 2 set. 2013.

FISCH, G.; TOTA, J.; MACHADO, L. A. T.; SILVA DIAS, M. A. F.; DA F. LYRA, R. F.; NOBRE, C. A.; DOLMAN, A. J.; GASH, J. H. C. The convective boundary layer

over pasture and forest in Amazonia. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 78, n. 1–3, , jun. 2004. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s00704-004-0043-x>. Acesso em: 22 jun. 2021.

FORSTER, P.; RAMASWAMY, V.; ARTAXO, P.; BERNTSEN, T.; BETTS, R.; FAHEY, D. W.; HAYWOOD, J.; LEAN, J.; LOWE, D. C.; MYHRE, G.; NGANGA, J.; PRINN, R.; RAGA, G.; SCHULZ, M.; VAN DORLAND, R. *Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing Chapter 2*. United Kingdom: Cambridge University Press, 2007. Disponível em: http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:39002468

FRANCO, M. A. de M. *Vertical transport, growth processes, and aerosol characterization in Amazonia*. 2021. Doutorado em Física – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/43/43134/tde-07102021-174257/>. Acesso em: 26 out. 2021.

FRANCO, M. A.; DITAS, F.; KREMPER, L. A.; MACHADO, L. A. T.; ANDREAE, M. O.; ARAÚJO, A.; BARBOSA, H. M. J.; DE BRITO, J. F.; CARBONE, S.; HOLANDA, B. A.; MORAIS, F. G.; NASCIMENTO, J. P.; PÖHLKER, M. L.; RIZZO, L. V.; SÁ, M.; SATURNO, J.; WALTER, D.; WOLFF, S.; PÖSCHL, U.; ARTAXO, P.; PÖHLKER, C. *Occurrence and growth of sub-50 nm aerosol particles in the Amazonian boundary layer*. preprint[S.I.]: Aerosols/Field Measurements/Troposphere/Physics (physical properties and processes), 9 set. 2021. Disponível em: <https://acp.copernicus.org/preprints/acp-2021-765/>. Acesso em: 05 fev. 2022.

GASTEIGER, J.; EMDE, C.; MAYER, B.; BURAS, R.; BUEHLER, S. A.; LEMKE, O. Representative wavelengths absorption parameterization applied to satellite channels and spectral bands. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, v. 148, p. 99–115, nov. 2014.

GERAB, F. **Técnicas analíticas nucleares aplicadas a medida em larga escala de aerossóis atmosféricos na região amazônica**. 1996. Doutorado em Física Nuclear – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/43/43131/tde-04102012-144415/>.

Acesso em: 20 dez. 2021.

GILES, D. M.; SINYUK, A.; SOROKIN, M. G.; SCHAFER, J. S.; SMIRNOV, A.; SLUTSKER, I.; ECK, T. F.; HOLBEN, B. N.; LEWIS, J. R.; CAMPBELL, J. R.; WELTON, E. J.; KORKIN, S. V.; LYAPUSTIN, A. I. Advancements in the Aerosol Robotic Network (AERONET) Version 3 database – automated near-real-time quality control algorithm with improved cloud screening for Sun photometer aerosol optical depth (AOD) measurements. **Atmospheric Measurement Techniques**, v. 12, n. 1, p. 169–209, 11 jan. 2019.

GORDON, J. I.; JOHNSON, R. W. Integrating nephelometer: theory and implications. **Applied Optics**, v. 24, n. 16, p. 2721, 15 ago. 1985.

GOULDING, M.; BARTHEM, R.; FERREIRA, E. J. G. **The Smithsonian atlas of the Amazon**. Washington, D.C: Smithsonian Books, 2003. 253 p.

HAMMER, M. S.; MARTIN, R. V.; VAN DONKELAAR, A.; BUCHARD, V.; TORRES, O.; RIDLEY, D. A.; SPURR, R. J. D. Interpreting the ultraviolet aerosol index observed with the OMI satellite instrument to understand absorption by organic aerosols: implications for atmospheric oxidation and direct radiative effects. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 16, n. 4, p. 2507–2523, 1 mar. 2016.

HEALD, C. L.; RIDLEY, D. A.; KROLL, J. H.; BARRETT, S. R. H.; CADY-PEREIRA, K. E.; ALVARADO, M. J.; HOLMES, C. D. Contrasting the direct radiative effect and direct radiative forcing of aerosols. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 14, n. 11, p. 5513–5527, 4 jun. 2014.

HECOBIAN, A.; ZHANG, X.; ZHENG, M.; FRANK, N.; EDGERTON, E. S.; WEBER, R. J. Water-Soluble Organic Aerosol material and the light-absorption

characteristics of aqueous extracts measured over the Southeastern United States. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 10, n. 13, p. 5965–5977, 2 jul. 2010.

HITZENBERGER, R.; DUSEK, U.; BERNER, A. Black carbon measurements using an integrating sphere. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 101, n. D14, p. 19601–19606, 27 ago. 1996.

HOFFER, A.; GELENCSEK, A.; GUYON, P.; KISS, G.; SCHMID, O.; FRANK, G. P.; ARTAXO, P.; ANDREAE, M. O. Optical properties of humic-like substances (HULIS) in biomass-burning aerosols. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 6, n. 11, p. 3563–3570, 30 ago. 2006.

HOLANDA, B. A.; PÖHLKER, M. L.; SATURNO, J.; SÖRGEL, M.; DITAS, J.; DITAS, F.; WANG, Q.; DONT, T.; ARTAXO, P.; BARBOSA, H. M. J.; BRAGA, R.; BRITO, J.; CHENG, Y.; DOLLNER, M.; FRANCO, M. A.; KAISER, J.; KLIMACH, T.; KNOTE, C.; KRÜGER, O. O.; FÜTTERER, D.; LAVRIČ, J. V.; MA, N.; MACHADO, L. A. T.; MING, J.; MORAIS, F.; PAULSEN, H.; SAUER, D.; SCHLAGER, H.; SU, H.; WEINZIERL, B.; WALSER, A.; WALTER, D.; WENDISCH, M.; ZIEREIS, H.; ZÖGER, M.; PÖSCHL, U.; ANDREAE, M. O.; PÖHLKER, C. *Influx of African biomass burning aerosol during the Amazonian dry season through layered transatlantic transport of black carbon-rich smoke*. preprint[S.I.]: Aerosols/Field Measurements/Troposphere/Physics (physical properties and processes), 2 set. 2019. Disponível em: <https://www.atmos-chem-phys-discuss.net/acp-2019-775/>. Acesso em: 10 mar. 2020.

HOLBEN, B. N.; ECK, T. F.; SLUTSKER, I.; TANRE, D.; BUIS, J. P.; SETZER, A.; VERMOTE, E.; REAGAN, J. A.; KAUFMAN, Y. J.; NAKAJIMA, T.; LAVENU, F.; JANKOWIAK, I.; SMIRNOV, A. AERONET—A Federated Instrument Network and Data Archive for Aerosol Characterization. *Remote Sensing of Environment*, v. 66, n. 1, p. 1–16, out. 1998.

HOPKE, P. K.; GLADNEY, E. S.; GORDON, G. E.; ZOLLER, W. H.; JONES, A. G. The use of multivariate analysis to identify sources of selected elements in the

Boston urban aerosol. *Atmospheric Environment* (1967), v. 10, n. 11, p. 1015–1025, jan. 1976.

IPCC. Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. *Climate Change 2013 - The Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. p. 659–740. Disponível em: https://www.cambridge.org/core/product/identifier/CBO9781107415324A026/type/book_part. Acesso em: 02 jun. 2020.

JO, D. S.; PARK, R. J.; LEE, S.; KIM, S.-W.; ZHANG, X. A global simulation of brown carbon: implications for photochemistry and direct radiative effect. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 16, n. 5, p. 3413–3432, 16 mar. 2016.

JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W.; OTHERS. *Applied multivariate statistical analysis*. [S.l.]: Pearson London, UK:, 2014. v. 6.

KANAKIDOU, M.; SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N.; BARNES, I.; DENTENER, F. J.; FACCHINI, M. C.; VAN DINGENEN, R.; ERVENS, B.; NENES, A.; NIELSEN, C. J.; SWIETLICKI, E.; PUTAUD, J. P.; BALKANSKI, Y.; FUZZI, S.; HORTH, J.; MOORTGAT, G. K.; WINTERHALTER, R.; MYHRE, C. E. L.; TSIGARIDIS, K.; VIGNATI, E.; STEPHANOU, E. G.; WILSON, J. *Organic aerosol and global climate modelling: a review*. preprint[S.l.: s.n.], 28 set. 2004. Disponível em: <https://acp.copernicus.org/preprints/4/5855/2004/acpd-4-5855-2004.pdf>. Acesso em: 22 jun. 2021.

KAUFMAN, Y. J.; NAKAJIMA, T. Effect of Amazon Smoke on Cloud Microphysics and Albedo-Analysis from Satellite Imagery. *Journal of Applied Meteorology*, v. 32, n. 4, p. 729–744, abr. 1993.

KIRCHSTETTER, T. W.; NOVAKOV, T.; HOBBS, P. V. Evidence that the spectral dependence of light absorption by aerosols is affected by organic carbon: SPECTRAL LIGHT ABSORPTION BY AEROSOLS. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 109, n. D21, p. n/a-n/a, 16 nov. 2004.

KYLLING, A. ***Radiation transport in cloudy and aerosol loaded atmospheres.*** 1992. PhD Thesis – 1992. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11122/9381>

LACK, D. A.; LANGRIDGE, J. M. On the attribution of black and brown carbon light absorption using the Ångström exponent. ***Atmospheric Chemistry and Physics***, v. 13, n. 20, p. 10535–10543, 31 out. 2013.

LEE, H. J. (Julie); AIONA, P. K.; LASKIN, A.; LASKIN, J.; NIZKORODOV, S. A. Effect of Solar Radiation on the Optical Properties and Molecular Composition of Laboratory Proxies of Atmospheric Brown Carbon. ***Environmental Science & Technology***, v. 48, n. 17, p. 10217–10226, 2 set. 2014.

LEITÃO, M. de M. V. B. R.; SANTOS, J. M. Dos; OLIVEIRA, G. M. De. Estimativas do albedo em três ecossistemas da floresta amazônica. ***Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental***, v. 6, n. 2, p. 256–261, 2002.

LIU, B. Y. H.; LEE, K. W. Efficiency of membrane and nuclepore filters for submicrometer aerosols. ***Environmental Science & Technology***, v. 10, n. 4, p. 345–350, abr. 1976.

MAENHAUT, W.; RAES, N.; CHI, X.; CAFMEYER, J.; WANG, W.; SALMA, I. Chemical composition and mass closure for fine and coarse aerosols at a kerbside in Budapest, Hungary, in spring 2002. ***X-Ray Spectrometry***, v. 34, n. 4, p. 290–296, jul. 2005.

MARTINS, J. V.; ARTAXO, P.; KAUFMAN, Y. J.; CASTANHO, A. D.; REMER, L. A. Spectral absorption properties of aerosol particles from 350–2500nm. ***Geophysical Research Letters***, v. 36, n. 13, p. L13810, 14 jul. 2009.

MARTINS, J. V.; ARTAXO, P.; LIOUSSE, C.; REID, J. S.; HOBBS, P. V.; KAUFMAN, Y. J. Effects of black carbon content, particle size, and mixing on light absorption by aerosols from biomass burning in Brazil. ***Journal of Geophysical Research: Atmospheres***, v. 103, n. D24, p. 32041–32050, 27 dez. 1998.

MAYER, B.; KYLLING, A. Technical note: The libRadtran software package for radiative transfer calculations - description and examples of use. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 5, n. 7, p. 1855–1877, 26 jul. 2005.

MOK, J.; KROTKOV, N. A.; AROLA, A.; TORRES, O.; JETHVA, H.; ANDRADE, M.; LABOW, G.; ECK, T. F.; LI, Z.; DICKERSON, R. R.; STENCHIKOV, G. L.; OSIPOV, S.; REN, X. Impacts of brown carbon from biomass burning on surface UV and ozone photochemistry in the Amazon Basin. *Scientific Reports*, v. 6, n. 1, p. 36940, dez. 2016.

MOOSMÜLLER, H.; SORENSEN, C. M. Single scattering albedo of homogeneous, spherical particles in the transition regime. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, v. 219, p. 333–338, nov. 2018.

MORAN-ZULOAGA, D.; DITAS, F.; WALTER, D.; SATURNO, J.; BRITO, J.; CARBONE, S.; CHI, X.; HRABĚ DE ANGELIS, I.; BAARS, H.; GODOI, R. H. M.; HEESE, B.; HOLANDA, B. A.; LAVRIČ, J. V.; MARTIN, S. T.; MING, J.; PÖHLKER, M. L.; RUCKTESCHLER, N.; SU, H.; WANG, Y.; WANG, Q.; WANG, Z.; WEBER, B.; WOLFF, S.; ARTAXO, P.; PÖSCHL, U.; ANDREAE, M. O.; PÖHLKER, C. Long-term study on coarse mode aerosols in the Amazon rain forest with the frequent intrusion of Saharan dust plumes. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 18, n. 13, p. 10055–10088, 16 jul. 2018.

MÜLLER, T.; HENZING, J. S.; DE LEEUW, G.; WIEDENSOHLER, A.; ALASTUEY, A.; ANGELOV, H.; BIZJAK, M.; COLLAUD COEN, M.; ENGSTRÖM, J. E.; GRUENING, C.; HILLAMO, R.; HOFFER, A.; IMRE, K.; IVANOW, P.; JENNINGS, G.; SUN, J. Y.; KALIVITIS, N.; KARLSSON, H.; KOMPPULA, M.; LAJ, P.; LI, S.-M.; LUNDER, C.; MARINONI, A.; MARTINS DOS SANTOS, S.; MOERMAN, M.; NOWAK, A.; OGREN, J. A.; PETZOLD, A.; PICHON, J. M.; RODRIQUEZ, S.; SHARMA, S.; SHERIDAN, P. J.; TEINILÄ, K.; TUCH, T.; VIANA, M.; VIRKKULA, A.; WEINGARTNER, E.; WILHELM, R.; WANG, Y. Q. Characterization and intercomparison of aerosol absorption photometers: result of two intercomparison

workshops. *Atmospheric Measurement Techniques*, v. 4, n. 2, p. 245–268, 10 fev. 2011.

NG, N. L.; HERNDON, S. C.; TRIMBORN, A.; CANAGARATNA, M. R.; CROTEAU, P. L.; ONASCH, T. B.; SUEPER, D.; WORSNOP, D. R.; ZHANG, Q.; SUN, Y. L.; JAYNE, J. T. An Aerosol Chemical Speciation Monitor (ACSM) for Routine Monitoring of the Composition and Mass Concentrations of Ambient Aerosol. *Aerosol Science and Technology*, v. 45, n. 7, p. 780–794, jul. 2011.

PALÁCIOS, R. da S. *Interação entre a Radiação Solar Direta e os Aerossóis Atmosféricos na Amazônia*. 2017. 159 p. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Física, Cuiabá, 2017.

PALÁCIOS, R. da S.; MORAIS, F. G.; LANDULFO, E.; FRANCO, M. A. de M.; KUHNEN, I. A.; MARQUES, J. B.; NOGUEIRA, J. de S.; JÚNIOR, L. C. G. do V.; RODRIGUES, T. R.; ROMERA, K. S.; CURADO, L. F. A.; BANGA, N. M.; ROTHMUND, L. D.; SALLO, F. da S.; MORAIS, D.; SANTOS, A. C. A.; MORAES, T. J. Long Term Analysis of Optical and Radiative Properties of Aerosols in the Amazon Basin. *Aerosol and Air Quality Research*, v. 20, n. 1, p. 139–154, 2020.

PETZOLD, A.; KRAMER, H.; SCHONLINNER, M. Continuous measurement of atmospheric black carbon using a multi-angle absorption photometer. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 9, n. Special issue 4, p. 78–82, 2002.

PETZOLD, Andreas; SCHÖNLINNER, M. Multi-angle absorption photometry—a new method for the measurement of aerosol light absorption and atmospheric black carbon. *Journal of Aerosol Science*, v. 35, n. 4, p. 421–441, abr. 2004.

PÖHLKER, C.; WALTER, D.; PAULSEN, H.; KÖNEMANN, T.; RODRÍGUEZ-CABALLERO, E.; MORAN-ZULOAGA, D.; BRITO, J.; CARBONE, S.; DEGRENDELE, C.; DESPRÉS, V. R.; DITAS, F.; HOLANDA, B. A.; KAISER, J. W.; LAMMEL, G.; LAVRIČ, J. V.; MING, J.; PICKERSGILL, D.; PÖHLKER, M. L.;

PRASS, M.; LÖBS, N.; SATURNO, J.; SÖRGEL, M.; WANG, Q.; WEBER, B.; WOLFF, S.; ARTAXO, P.; PÖSCHL, U.; ANDREAE, M. O. Land cover and its transformation in the backward trajectory footprint region of the Amazon Tall Tower Observatory. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 19, n. 13, p. 8425–8470, 3 jul. 2019.

PÖHLKER, M. L.; PÖHLKER, C.; DITAS, F.; KLIMACH, T.; HRABE DE ANGELIS, I.; ARAÚJO, A.; BRITO, J.; CARBONE, S.; CHENG, Y.; CHI, X.; DITZ, R.; GUNTHER, S. S.; KESSELMEIER, J.; KÖNEMANN, T.; LAVRIČ, J. V.; MARTIN, S. T.; MIKHAILOV, E.; MORAN-ZULOAGA, D.; ROSE, D.; SATURNO, J.; SU, H.; THALMAN, R.; WALTER, D.; WANG, J.; WOLFF, S.; BARBOSA, H. M. J.; ARTAXO, P.; ANDREAE, M. O.; PÖSCHL, U. Long-term observations of cloud condensation nuclei in the Amazon rain forest – Part 1: Aerosol size distribution, hygroscopicity, and new model parametrizations for CCN prediction. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 16, n. 24, p. 15709–15740, 20 dez. 2016.

PONCZEK, M.; FRANCO, M. A.; CARBONE, S.; RIZZO, L. V.; MONTEIRO DOS SANTOS, D.; MORAIS, F. G.; DUARTE, A.; BARBOSA, H. M. J.; ARTAXO, P. Linking the chemical composition and optical properties of biomass burning aerosols in Amazonia. *Environmental Science: Atmospheres*, p. 10.1039.D1EA00055A, 2022.

REID, J. S.; HOBBS, P. V.; LIOUSSE, C.; MARTINS, J. V.; WEISS, R. E.; ECK, T. F. Comparisons of techniques for measuring shortwave absorption and black carbon content of aerosols from biomass burning in Brazil. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 103, n. D24, p. 32031–32040, 27 dez. 1998.

RIZZO, L. V.; ARTAXO, P.; MÜLLER, T.; WIEDENSOHLER, A.; PAIXÃO, M.; CIRINO, G. G.; ARANA, A.; SWIETLICKI, E.; ROLDIN, P.; FORS, E. O.; WIEDEMANN, K. T.; LEAL, L. S. M.; KULMALA, M. Long term measurements of aerosol optical properties at a primary forest site in Amazonia. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 13, n. 5, p. 2391–2413, 1 mar. 2013.

RIZZO, L. V.; CORREIA, A. L.; ARTAXO, P.; PROCÓPIO, A. S.; ANDREAE, M. O. Spectral dependence of aerosol light absorption over the Amazon Basin. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 11, n. 17, p. 8899–8912, 1 set. 2011.

ROCHA-LIMA, A.; MARTINS, J. V.; REMER, L. A.; KROTKOV, N. A.; TABACNIKS, M. H.; BEN-AMI, Y.; ARTAXO, P. Optical, microphysical and compositional properties of the Eyjafjallajökull volcanic ash. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 14, n. 19, p. 10649–10661, 10 out. 2014.

ROCHA-LIMA, Adriana; MARTINS, J. V.; REMER, L. A.; TODD, M.; MARSHAM, J. H.; ENGELSTAEDTER, S.; RYDER, C. L.; CAVAZOS-GUERRA, C.; ARTAXO, P.; COLARCO, P.; WASHINGTON, R. A detailed characterization of the Saharan dust collected during the Fennec campaign in 2011: in situ ground-based and laboratory measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 18, n. 2, p. 1023–1043, 26 jan. 2018.

RUSSELL, P. B.; BERGSTROM, R. W.; SHINOZUKA, Y.; CLARKE, A. D.; DECARLO, P. F.; JIMENEZ, J. L.; LIVINGSTON, J. M.; REDEMANN, J.; DUBOVIK, O.; STRAWA, A. Absorption Angstrom Exponent in AERONET and related data as an indicator of aerosol composition. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 10, n. 3, p. 1155–1169, 3 fev. 2010.

SAFO-ADU, G.; CARBOO, D.; ARMAH, Y. S.; ACCRA, L. Heavy metals and black carbon assessment of PM10 particulates along Accra- Tema highway in Ghana. 2014,

SALEH, R.; MARKS, M.; HEO, J.; ADAMS, P. J.; DONAHUE, N. M.; ROBINSON, A. L. Contribution of brown carbon and lensing to the direct radiative effect of carbonaceous aerosols from biomass and biofuel burning emissions. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 120, n. 19, , 16 out. 2015. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2015JD023697>. Acesso em: 22 jun. 2021.

SANTOS JUNIOR, D. A. M. Dos. **Annálise dos processos de formação de aerossóis orgânicos secundários na macrorregião metropolitana de São Paulo**. 2021. Tese (Doutorado em Física) – Universidade de São Paulo, Instituto de Física, 2021.

SANTOS JUNIOR, D. A. M. Dos. **Emissões veiculares em São Paulo: quantificação de fontes com modelos receptores e caracterização do material carbonáceo**. 2015. Mestrado em Física – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/43/43134/tde-17072015-135624/>. Acesso em: 10 jan. 2022.

SATURNO, J.; HOLANDA, B. A.; PÖHLKER, C.; DITAS, F.; WANG, Q.; MORANZULOAGA, D.; BRITO, J.; CARBONE, S.; CHENG, Y.; CHI, X.; DITAS, J.; HOFFMANN, T.; HRABE DE ANGELIS, I.; KÖNEMANN, T.; LAVRIČ, J. V.; MA, N.; MING, J.; PAULSEN, H.; PÖHLKER, M. L.; RIZZO, L. V.; SCHLAG, P.; SU, H.; WALTER, D.; WOLFF, S.; ZHANG, Y.; ARTAXO, P.; PÖSCHL, U.; ANDREAE, M. O. Black and brown carbon over central Amazonia: long-term aerosol measurements at the ATTO site. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 18, n. 17, p. 12817–12843, 6 set. 2018.

SCHKOLNIK, G.; CHAND, D.; HOFFER, A.; ANDREAE, M. O.; ERLICK, C.; SWIETLICKI, E.; RUDICH, Y. Constraining the density and complex refractive index of elemental and organic carbon in biomass burning aerosol using optical and chemical measurements. **Atmospheric Environment**, v. 41, n. 5, p. 1107–1118, fev. 2007.

SCHWARZ, J. P.; GAO, R. S.; FAHEY, D. W.; THOMSON, D. S.; WATTS, L. A.; WILSON, J. C.; REEVES, J. M.; DARBEHESHTI, M.; BAUMGARDNER, D. G.; KOK, G. L.; CHUNG, S. H.; SCHULZ, M.; HENDRICKS, J.; LAUER, A.; KÄRCHER, B.; SLOWIK, J. G.; ROSENLOF, K. H.; THOMPSON, T. L.; LANGFORD, A. O.; LOEWENSTEIN, M.; AIKIN, K. C. Single-particle measurements of midlatitude black carbon and light-scattering aerosols from the boundary layer to the lower stratosphere. **Journal of Geophysical Research**, v. 111, n. D16, p. D16207, 2006.

SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N.; NOONE, K. *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change. Physics Today*, v. 51, n. 10, p. 88–90, out. 1998.

SENA, E. T.; ARTAXO, P.; CORREIA, A. L. Spatial variability of the direct radiative forcing of biomass burning aerosols and the effects of land use change in Amazonia. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 13, n. 3, p. 1261–1275, 1 fev. 2013.

SONWANI, S.; YADAV, A.; SAXENA, P. Atmospheric Brown Carbon: A Global Emerging Concern for Climate and Environmental Health. *Management of Contaminants of Emerging Concern (CEC) in Environment*. [S.l.]: Elsevier, 2021. p. 225–247. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128222638000087>. Acesso em: 23 set. 2021.

SPURNY, K.; LODGE, J. P.; FRANK, E. R.; SHEESLEY, D. C. Aerosol filtration by means of Nuclepore filters: structural and filtration properties. *Environmental Science & Technology*, v. 3, n. 5, p. 453–464, 1 maio. 1969.

STAMNES, K.; TSAY, S.-C.; WISCOMBE, W.; JAYAWEERA, K. Numerically stable algorithm for discrete-ordinate-method radiative transfer in multiple scattering and emitting layered media. *Applied Optics*, v. 27, n. 12, p. 2502, 15 jun. 1988.

STEPHENS, M.; TURNER, N.; SANDBERG, J. Particle identification by laser-induced incandescence in a solid-state laser cavity. *Applied Optics*, v. 42, n. 19, p. 3726, 1 jul. 2003.

VAN GRIEKEN, R.; MARKOWICZ, A. *Handbook of X-Ray Spectrometry*. 0. ed., [S.l.]: CRC Press, 2001. Disponível em: <https://www.taylorfrancis.com/books/9780203908709>. Acesso em: 10 nov. 2021.

VAN MEEL, K.; HOREMANS, B.; KRATA, A.; BENCS, L.; BUCZYŃSKA, A. J.; DIRTU, A. C.; WOROBIEC, A.; VAN GRIEKEN, R. Elemental concentrations in

aerosols at the Belgian coast versus seasons and air mass trajectories. *Environmental Chemistry Letters*, v. 8, n. 2, p. 157–163, jun. 2010.

WANG, X.; HEALD, C. L.; RIDLEY, D. A.; SCHWARZ, J. P.; SPACKMAN, J. R.; PERRING, A. E.; COE, H.; LIU, D.; CLARKE, A. D. Exploiting simultaneous observational constraints on mass and absorption to estimate the global direct radiative forcing of black carbon and brown carbon. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 14, n. 20, p. 10989–11010, 20 out. 2014.

WANG, Xuan; HEALD, C. L.; LIU, J.; WEBER, R. J.; CAMPUZANO-JOST, P.; JIMENEZ, J. L.; SCHWARZ, J. P.; PERRING, A. E. Exploring the observational constraints on the simulation of brown carbon. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 18, n. 2, p. 635–653, 19 jan. 2018.

WANG, Xuan; HEALD, C. L.; SEDLACEK, A. J.; DE SÁ, S. S.; MARTIN, S. T.; ALEXANDER, M. L.; WATSON, T. B.; AIKEN, A. C.; SPRINGSTON, S. R.; ARTAXO, P. Deriving brown carbon from multiwavelength absorption measurements: method and application to AERONET and Aethalometer observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 16, n. 19, p. 12733–12752, 13 out. 2016.

WEINGARTNER, E.; SAATHOFF, H.; SCHNAITER, M.; STREIT, N.; BITNAR, B.; BALTENSBERGER, U. Absorption of light by soot particles: determination of the absorption coefficient by means of aethalometers. *Journal of Aerosol Science*, v. 34, n. 10, p. 1445–1463, out. 2003.

YAMASOE, M. A. *Estudo de Propriedades Ópticas de Partículas de Aerossóis a partir de uma Rede de Radiômetros*. 1999. Doutorado em Física Nuclear – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/43/43131/tde-08112013-113729/>. Acesso em: 03 nov. 2021.

YAMASOE, M.; DE PAULA CORREA, M. **Processos radiativos na atmosfera FUNDAMENTOS**. [S.l: s.n.], 2016.

YAN, J.; WANG, X.; GONG, P.; WANG, C.; CONG, Z. Review of brown carbon aerosols: Recent progress and perspectives. **Science of The Total Environment**, v. 634, p. 1475–1485, set. 2018.

YANG, M.; HOWELL, S. G.; ZHUANG, J.; HUEBERT, B. J. Attribution of aerosol light absorption to black carbon, brown carbon, and dust in China – interpretations of atmospheric measurements during EAST-AIRE. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 9, n. 6, p. 2035–2050, 20 mar. 2009.

ZHANG, A.; WANG, Y.; ZHANG, Y.; WEBER, R. J.; SONG, Y.; KE, Z.; ZOU, Y. Modeling global radiative effect of brown carbon: A larger heating source in the tropical free troposphere than black carbon. **Atmospheric Chemistry and Physics Discussions**, p. 1–36, 2 jul. 2019.

ZHANG, X.; LIN, Y.-H.; SURRATT, J. D.; WEBER, R. J. Sources, Composition and Absorption Ångström Exponent of Light-absorbing Organic Components in Aerosol Extracts from the Los Angeles Basin. **Environmental Science & Technology**, v. 47, n. 8, p. 3685–3693, 16 abr. 2013.

ZHAO, R.; LEE, A. K. Y.; HUANG, L.; LI, X.; YANG, F.; ABBATT, J. P. D. Photochemical processing of aqueous atmospheric brown carbon. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 15, n. 11, p. 6087–6100, 4 jun. 2015.

APÊNDICE A – Artigos publicados durante o doutorado

Tivemos 14 artigos publicados ao longo deste doutorado. Alguns lidaram com questões associadas à filtração de máscaras utilizadas como proteção contra a COVID-19. Outros trabalhos fizemos como colaboração e parcerias científicas.

A1 Filtration efficiency of a large set of COVID-19 face masks commonly used in Brazil

Aerosol Science and Technology pag. 1028-1041. Published online: 26 Apr 2021
<https://doi.org/10.1080/02786826.2021.1915466>

Fernando G. Morais, Victor K. Sakano, Lucas N. de Lima, Marco A. Franco, Daniel Costa Reis, Liz M. Zanchetta, Fabio Jorge, Eduardo Landulfo, Luiz Henrique Catalani, Henrique M. J. Barbosa, Vanderley M. John & Paulo Artaxo.

A2 Tropical and boreal forest--atmosphere interactions: A review

Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, Taylor and Francis.
<https://doi.org/10.1080/16000889.2021.2015129>.

Paulo Artaxo, Hans-Christen Hansson, Meinrat O. Andreae, Jaana Bäck, Eliane Gomes Alves, Henrique M. J. Barbosa, Frida Bender, Efstratios Bourtsoukidis, Samara Carbone, Jinshu Chi, Stefano Decesari, Viviane R. Després, Florian Ditas, Ekaterina Ezhova, Sandro Fuzzi, Niles J. Hasselquist, Jost Heintzenberg, Bruna A. Holanda, Alex Guenther, Hannele Hakola, Liine Heikkinen, Veli-Matti Kerminen, Jenni Kontkanen, Radovan Krejci, Markku Kulmala, Jost V. Lavric, Gerrit de Leeuw, Katrianne Lehtipalo, Luiz Augusto T. Machado, Gordon McFiggans, Marco Aurelio M. Franco, Bruno Backes Meller, Fernando G. Morais, Claudia Mohr, William Morgan, Mats B. Nilsson, Matthias Peichl, Tuukka Petäjä, Maria Praß, Christopher Pöhlker, Mira L. Pöhlker, Ulrich Pöschl, Celso Von Randow, Ilona Riipinen, Janne Rinne, Luciana V. Rizzo, Daniel Rosenfeld, Maria A. F. Silva Dias, Larisa Sogacheva, Philip Stier, Erik Swietlicki, Matthias Sörgel, Peter Tunved, Aki Virkkula, Jian Wang, Bettina Weber, Ana Maria Yáñez-Serrano, Paul Zieger, Eugene Mikhailov, James N. Smith, Jürgen Kesselmeier.

A3 Occurrence and growth of sub-50 nm aerosol particles in the Amazonian boundary layer

Atmospheric Chemistry and Physics, <https://doi.org/10.5194/acp-2021-765>

Marco A. Franco, Florian Ditas, Leslie Ann Kremper, Luiz A. T. Machado, Meinrat O. Andreae, Alessandro Araújo, Henrique M. J. Barbosa, Joel F. de Brito, Samara Carbone, Bruna A. Holanda, Fernando G. Morais, Janaína P. Nascimento, Mira L. Pöhlker, Luciana V. Rizzo, Marta Sá, Jorge Saturno, David Walter, Stefan Wolff, Ulrich Pöschl, Paulo Artaxo, and Christopher Pöhlker.

A4 Linking chemical composition and optical properties of biomass burning aerosols in Amazonia

Environ. Sci.: Atmos., 2022, DOI: [10.1039/d1ea00055a](https://doi.org/10.1039/d1ea00055a), Part of ISSN: 2634-3606

Milena Ponczek, Marco Aurélio de Menezes Franco, Samara Carbone, Luciana Varanda Rizzo, Djacinto Aparecido Monteiro dos Santos, Fernando Gonçalves Morais, Alejandro Fonseca Duarte, Henrique de Melo Jorge Barbosa and Paulo Artaxo

A5 Decontamination and reuse of surgical masks and respirators during the COVID-19 pandemic

International Journal of Infectious Diseases Volume 104, March 2021, Pages 320-328. <https://doi.org/10.1016/j.ijid.2020.12.056>

Marina Farrel Côrtes, Evelyn Patricia Sanchez Espinoza, Saily Liceth Vásconez Noguera, Aline Alves Silva, Marion Elke Sielfeld Araya de Medeiros, Lucy Santos Villas Boas, Noely E Ferreira, Tania Regina Tozetto-Mendoza, Fernando Gonçalves Morais, Rayana Santiago de Queiroz, Adriana Coracini Tonacio de Proenca, Thais Guimaraes, Ana Rubia Guedes, Leila Suemi Harima Letaif, Amanda Cardoso Montal, Maria Cassia Mendes-Correa, Vanderley M. John, Anna S. Levin, Silvia F. Costa.

A6 Aerosol properties in the atmosphere of Natal/Brazil measured by an AERONET Sun-photometer

Environmental Science and Pollution Research volume 28, pag. 9806–9823
Published: 06 November 2020. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11373-z>

Daniel Camilo Fortunato dos Santos Oliveira, Elena Montilla-Rosero, Fábio Juliano da Silva Lopes, Fernando Gonçalves Morais, Eduardo Landulfo, Judith Johanna Hoelzemann.

A7 Long-term measurements of aerosol optical properties and radiative forcing (2011-2017) over Central Amazonia

Atmósfera, August 2020 - <https://doi.org/10.20937/ATM.52892>

Rafael da Silva Palácios, Paulo Eduardo Artaxo, Glauber Guimarães Cirino, Valeria Nakale, Fernando Gonçalves Morais, Lucas Douglas Rothmund, Angélica Yara Siqueira, Marcelo Sacardi Biudes, Nadja Gomes Machado, Leone Francisco Amorim Curado, João Basso Marques, José de Souza Nogueira

A8 Exploring the Twilight Zone: a multi-sensor approach

EPJ Web Conferences 237, July 2020 ILRC 29 -

<https://doi.org/10.1051/epjconf/202023707015>

Jonatan da Silva, Fernando G. Morais, Marco A. Franco, Fabio J. S. Lopes, Gregori de A. Moreira, Alexandre C. Yoshida, Alexandre Correia e Eduardo Landulfo.

A9 Influx of African biomass burning aerosol during the Amazonian dry season through layered transatlantic transport of Black Carbon-rich smoke

Atmos. Chem. Phys., April 2020 - <https://doi.org/10.5194/acp-20-4757-2020>

Bruna A. Holanda, Mira L. Pöhlker, David Walter, Jorge Saturno, Matthias Sörgel, Jeannine Ditas, Florian Ditas, Christiane Schulz, Marco Aurélio Franco, Qiaoqiao Wang, Tobias Donth, Paulo Artaxo, Henrique M. J. Barbosa, Stephan Borrmann, Ramon Braga, Joel Brito, Yafang Cheng, Maximilian Dollner, Johannes W. Kaiser, Thomas Klimach, Christoph Knote, Ovid O. Krüger, Daniel Fütterer, Jošt V. Lavrič, Nan Ma, Luiz A. T. Machado, Jing Ming, Fernando G. Morais, Hauke Paulsen, Daniel Sauer, Hans Schlager, Johannes Schneider, Hang Su, Bernadett Weinzierl, Adrian Walser, Manfred Wendisch, Helmut Ziereis, Martin Zöger, Ulrich Pöschl, Meinrat O. Andreae, and Christopher Pöhlker

A10 Long Term Analysis of Optical and Radiative Properties of Aerosols in the Amazon Basin

Aerosol and Air Quality Research, January 2020 - doi: 10.4209/aaqr.2019.04.0189

Rafael da Silva Palácios, Kelly Sousa Romera, Leone Francisco Amorim Curado, Nelson Mario Banga, Thiago Rangel Rodrigues, Lucas Douglas Rothmund, Fernando da Silva Sallo, Denes Morais, Anna Carolinna Albino Santos, Tonny Jader Moraes, Fernando Gonçalves Morais, Eduardo Landulfo, Marco Aurélio de Menezes Franco, Igor Antonio Kuhn, João Basso Marques, José de Souza Nogueira.

A11 Ground-based observation of clusters and nucleation mode particles in the Amazon

Atmos. Chem. Phys., September 2018 - <https://doi.org/10.5194/acp-18-13245-2018>

Daniela Wimmer, Stephany Buenrostro Mazon, Hanna Elina Manninen, Juha Kangasluoma, Alessandro Franchin, Tuomo Nieminen, John Backman, JianWang, Chongai Kuang, Radovan Krejci, Joel Brito, Fernando Gonçalves Morais, Scot Turnbull Martin, Paulo Artaxo, Markku Kulmala, Veli-Matti Kerminen, and Tuukka Petäjä.

A12 Recent progress of filtration mechanism to fabricate the effective COVID-masks: A review

Journal of Compositios and Compounds (2021) <https://doi.org/10.52547/jcc.3.4.3>

Rupinder Singh, Zahra Rabiei Dolatabadi, Nalini Tripathi, Shamim Mukhtar, Dhastagir Sultan Sheriff, Fernando G. Morais, and Parisa Shafiee

A13 Influence of microstructure and physical characteristics in the performance of non-professional masks sold in São Paulo

Elsevier Public Health <https://doi.org/10.1016/j.puhe.2022.01.009> Volume 205, April 2022, Pages 90-98

Lucas Nascimento de Lima, Daniel Costa Reis, Victor Keniti Sakano, Marco Aurélio Franco, Fernando Gonçalves Morais and Vanderley MoacyrJohn

A14 Optical properties and spectral dependence of aerosol light absorption over the Brazilian Pantanal

Atmospheric Pollution Research Volume 13, Issue 5, May 2022, 101413
<https://doi.org/10.1016/j.apr.2022.101413>

Rafael Palácios, Kelly Romera, Luciana Rizzo, Glauber Cirino, David Adams, Breno Imbiriba, Danielle Nassarden, Lucas Rothmund, Angélica Siqueira, João Basso, Thiago Rodrigues, Leone Curado, Alfredo Weber, José Nogueira, Fernando Morais, Paulo Artaxo.

APÊNDICE B - Apresentações em congresso

IAC 2018 Saint Louis EUA

Scattering and Absorption Properties of Aerosols in Amazonia Using Remote Sensing (AERONET and AURA) and in situ Measurements. Fernando G. Morais, Eduardo Landulfo, Paulo Artaxo, Joel Schafer and Rafael Palácios.

XWLMLA 2018 Medellín, Colômbia

Long Term Scattering and Absorption Properties of Aerosols in Amazonia Using AERONET Measurements. Fernando G. Morais, Eduardo Landulfo, Paulo Artaxo, Henrique Barbosa, Marco A. Franco and Rafael Palácios.

XWLMLA 2018 Medellín, Colômbia

Statistical Approach to Assess the Impact of Polluted Regions on the Aerosol Optical Depth Measured by AERONET Photometers. Marco Aurélio Franco, Fernando Morais, Zwinglio Guimarães Filho, Eduardo Landulfo, Paulo Artaxo.

EGU 2019 Viena, Áustria

Aerosol physical properties at different heights of the ATTO tower in the central Amazon rainforest. FRANCO, M. A. M.; ARTAXO, P.; Carbone, S.; RIZZO, L. V.; BARBOSA, H.; MORAIS, F.; POHLKER, C.; HOLANDA, B.; DITAS, F.; ANDREAE, M. O.

EGU 2019 Viena, Áustria

Western Amazonia aerosol and VOC measurements: Overview of 2018 intensive campaign and associated measurement. Joel Brito, Marco Aurélio de Menezes Franco, André Burguer, Samara Carbone, Fabio Jorge, Fernando Morais, Luciana V. Rizzo, Rafael Stern, Henrique Barbosa, and Paulo Artaxo.

EGU 2019 Viena, Áustria

Aerosol physical properties over the Amazon basin. Bruna Holanda, Jorge Saturno, Florian Ditas, Henrique Barbosa, Joel Brito, Samara Carbone, Yafang Cheng, Jeannine Ditas, Marco A. Franco, Thomas Klimach, Ovid Krüger, Nan Ma, Jing Ming, Fernando Morais, Daniel Moran-Zuloaga, Mira Pöhlker, Maria Praß, Hang Su,

David Walter, Qiaoqiao Wang, Paulo Artaxo, Ulrich Pöschl, Meinrat O. Andreae, Christopher Pöhlker.

AGU 2019 São Francisco, EUA

Long term characterization of Brown Carbon in Amazonia using AERONET and in situ measurements. Fernando G. Morais, Eduardo Landulfo, Paulo Artaxo, Marco A. Franco, Joel Schafer, Brent Holben.

AGU 2019 São Francisco, EUA

Vertical Variability of Aerosol Physical Properties at the Central Amazonia ATTO Tower in the Wet Season. Marco Aurélio Franco, Paulo Artaxo, Luciana Varanda Rizzo, Henrique M Barbosa, Fernando Morais, Samara Carbone, Christopher Pöhlker, Bruna Amorim Holanda, Florian Ditas, Meinrat O Andreae.

AGU 2020 online

The performance of a large number of COVID-19 facial masks used in Brazil for breathability and aerosol collection efficiency. Fernando G. Morais, Victor K. Sakano, Lucas N. de Lima, Marco A. Franco, Liz M. Zanchetta, Fabio Jorge, Daniel Costa Reis, Eduardo Landulfo, Luiz Henrique Catalani, Henrique Barbosa, Vanderley M. John, Paulo Artaxo.

AGU 2020 online

The Vertical Gradient of Aerosols in the Amazonian ATTO Tower: Optical Properties and Size Distributions. Marco A. Franco, Fernando G. Morais, Bruna A. Holanda, Florian Ditas, Leslie Kremper, Samara Carbone, Luciana Rizzo, Luiz A. Machado, Janaína Nascimento, Milena Ponczek, Henrique Barbosa, Meinrat O. Andreae, Ulrich Pöschl, Christopher Pöhlker, Paulo Artaxo.

AGU 2020 online

Composition, sources, and chemical processes of submicrometric aerosol over Southern Amazonian city highly impacted by biomass burning emissions. Milena Ponczek, Samara Carbone, Marco A. Franco, Djacinto Monteiro dos Santos, Fernando G. Morais, Luciana Rizzo, Henrique Barbosa, Paulo Artaxo.

XIWLMLA 2021 Puntarenas, Chile and online

Seasonal analysis of Brown Carbon, Black Carbon and Dust at Central Amazonia with Ångström Matrices. Fernando G. Morais, Marco Aurélio Franco, Henrique Barbosa, Fabio Jorge, Paulo Artaxo, Eduardo Landulfo.

AGU 2021 New Orleans, LA and online

Spectral absorption of Brown Carbon in the Amazon. Fernando G. Morais, Paulo Artaxo, Henrique Barbosa, Marco A. Franco, Delano Campos, Djacinto Santos Junior, Bruna Holanda, Christopher Pöhlker, Eduardo Landulfo, José Vanderlei Martins.

AGU 2021 New Orleans, LA and online

African smoke over the Amazon rainforest. Bruna A. Holanda, Marco A. Franco, David Walter, Meinrat O. Andreae, Paulo Artaxo, Samara Carbone, Yafang Cheng, Sourangsu Chowdhury, Florian Ditas, Martin Gysel-Beer, Thomas Klimach, Leslie A. Kremper, Ovid O. Krüger, Jost V. Lavric, Jos Lelieveld, Luiz A. T. Machado, Fernando G. Morais, Robin L. Modini, Andrea Pozzer, Jorge Saturno, Hang Su, Manfred Wendisch, Stefan Wolff, Mira L. Pöhlker, Ulrich Pöschl, Christopher Pöhlker.

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.