



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

**Climatologia da profundidade óptica do aerossol
no Brasil no período de 2000 a 2022.**

MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO

Gabriele Heloísa Augusto de Souza Cortez

Itajubá, MG, Brasil

2023

Climatologia da profundidade óptica do aerossol no Brasil no período de 2000 a 2022.

por

Gabriele Heloísa Augusto de Souza Cortez

Monografia apresentada à comissão examinadora Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas da Universidade Federal Itajubá (UNIFEI, MG), como requisito parcial para obtenção do grau de
Bacharel em Ciências Atmosféricas.

Orientador: Prof. Msc. André Luiz dos Reis

**Itajubá, MG, Brasil
2023**

**Universidade Federal de Itajubá
Instituto de Recursos Naturais
Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Monografia

**CLIMATOLOGIA DA PROFUNDIDADE ÓPTICA DO AEROSSOL NO
BRASIL NO PERÍODO 2000-2022**

elaborada por

Gabriele Heloisa Augusto de Souza Cortez

Como requisito parcial para a obtenção do grau de

Bacharel em Ciências Atmosféricas

Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **ANDRÉ LUIZ DOS REIS**
Data: 27/11/2023 11:38:34-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

André Luiz dos Reis, Msc. (UNIFEI)
(Presidente/Orientador)

Documento assinado digitalmente
 **DEBORA SOUZA ALVIM**
Data: 22/11/2023 11:59:59-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Débora Souza Alvim, Dr^a (USP/Lorena)

Documento assinado digitalmente
 **VANESSA SILVEIRA BARRETO CARVALHO**
Data: 25/11/2023 10:10:01-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Vanessa Silveira Barreto Carvalho, Dra. (UNIFEI)

Itajubá, 21 de novembro de 2023.

AGRADECIMENTOS

“Em tudo daí graças, porque essa é a vontade de Deus em Cristo Jesus para convosco. ”

1. Tessalonicenses 5.18.

Com esta passagem finalizo mais um ciclo da minha vida, agradecendo a Deus por iluminar o meu caminho nestes últimos anos, a Nossa Senhora das Graças por todo aconchego e colo de mãe, a minha amiga Santa Rita de Cássia que sempre escutou as preces e intercedeu como gloriosa advogada das causas impossíveis. Aos meus pais, Caroline e Arilson, por serem meu alicerce e conforto em todos os momentos, muito obrigada por nunca desistirem de mim e da nossa família, vocês são o exemplo mais lindo que eu poderia carregar no meu coração, te amo sempre.

Agradeço às minhas irmãs Ana Júlia e Beatriz Helena por serem meu brilho de sol nos dias nublados, vocês não reconhecem a força que vocês possuem, amo vocês.

Ao meu marido Thiago que sempre me apoiou e lutou comigo nesta batalha, sem você eu não seria a pessoa e nem meteorologista que estou me tornando, obrigada por toda confiança e aprendizagem, juntos somos invencíveis.

Agradeço ao meu orientador Prof. André Luiz dos Reis, por todo conhecimento cedido, pela oportunidade dada e por toda atenção, que Deus te abençoe e proteja sempre a sua família.

Hoje vivemos uma alegria e vitória imensa, sabendo que não é a primeira e nem a última conquista, porém grata de finalizá-la. Grata de ser parte do curso de Ciências Atmosféricas e por ter feito parte da Unifei.

Agradeço a todos os meus professores que sempre fizeram o impossível e acreditaram quando não víamos esperança. Despedir não é fácil, porém sempre levarei na mente os bons momentos e amigos que aqui encontrei. Muito obrigada a minha família, amigos, professores e citando a frase do fundador da Universidade, Theodomiro Santiago,

“Revelemo-nos, mais por atos do que por palavras,
dignos de possuir este grande país”.

Aos meus pais, Caroline e Arilson, ao meu marido Thiago,
as minhas irmãs Ana Julia e Beatriz Helena.

“Nossa sociedade está simultaneamente convivendo com três emergências importantes: 1) a crise na saúde; 2) a crise de perda de biodiversidade; e 3) a crise climática. Salieta-se que essas crises têm ligações profundas entre si, e diferenças importantes, mas todas provocam impactos sociais e econômicos fortes e afetam nosso planeta globalmente. ”

Paulo Artaxo, 2020.

RESUMO

Monografia de Graduação
Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Itajubá, MG, Brasil

Climatologia da profundidade óptica do aerossol no Brasil no período de 2000 a 2022.

AUTORA: Gabriele Heloísa Augusto de Souza Cortez
ORIENTADOR: André Luiz dos Reis
Local e Data da Defesa: Itajubá, 21 de novembro de 2023.

Os aerossóis são partículas sólidas ou líquidas (excluindo gotas de nuvens) suspensas na atmosfera, estas pequenas partículas interagem com o sistema climático modificando em escala global e local. Este particulado causa um impacto na produção de energias renováveis, como é o caso da energia solar e se inalados, alguns aerossóis podem ser prejudiciais à saúde. Portanto, este trabalho tem como proposta realizar uma climatologia da profundidade óptica do aerossol para as diferentes regiões do Brasil e evidenciar os impactos que podem ser causados. Foram utilizados dados de AOD na faixa de 500 nm das redes AERONET, GIOVANNI e CAMS dos anos de 2000 a 2022, obtendo médias mensais e sazonais para o período. Analisando as regiões brasileiras, observa-se que os maiores valores estão presentes na região Norte, prosseguindo de Centro-Oeste, Nordeste, Sudeste e Sul. As estações com menores meses de concentração para a região Norte foram os meses de verão e inverno, e a estação de maior valor foi a primavera com ênfase no mês de setembro, aonde ocorre muitos focos de queimadas, com pico entre 0.8 a 1. Identificou-se que as queimadas causam um grande impacto, principalmente na região norte e centro-oeste que é denominada de o arco do desmatamento. Conclui-se que o AOD impacta socialmente e economicamente o Brasil, com ênfase na região Norte.

Palavras-chave: Aerossol. Brasil. AOD. Climatologia. Impactos.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema da distribuição de tamanhos dos aerossóis atmosféricos e os processos que influenciam cada fração de tamanho de partículas.	6
Figura 2 – Readaptação do diagrama esquemático mostrando os efeitos radiativos dos aerossóis e nos mecanismos de formação e desenvolvimento de nuvens.	7
Figura 3 – Domínios climáticos do Brasil e principais subtipos.	9
Figura 4 – Localização das estações do AERONET no território Brasileiro. .	13
Figura 5 – Ângulo de inclinação ideal (θ).	16
Figura 6 – Região Sul.	17
Figura 7 – Região Nordeste.	18
Figura 8 – Região Norte.	19
Figura 9 – Região Centro-Oeste.	20
Figura 10 – Região Sudeste.	20
Figura 11 – Climatologia mensal dos focos de queimadas no território brasileiro de 1998 a 2023 pelo satélite de referência - AQUA Tarde . .	21
Figura 12 – Climatologia sazonal da propriedade óptica do aerossol para a reanálise do CAMS de 2003 a 2022.	22
Figura 13 – Climatologia sazonal da propriedade óptica do aerossol para a sensor MODIS a bordo do satélite TERRA de 2000 a 2023. . . .	23
Figura 14 – Climatologia sazonal da propriedade óptica do aerossol para a sensor MODIS a bordo do satélite AQUA de 2002 a 2023.	24
Figura 15 – Eficiência do efeito do aerossol sazonal ($AEE, kWh/m^2/d/\tau$). . .	25
Figura 16 – Climatologia mensal da propriedade óptica do aerossol para a reanálise do CAMS de 2003 a 2022.	33
Figura 17 – Climatologia mensal da propriedade óptica do aerossol para a sensor MODIS a bordo do satélite TERRA de 2000 a 2023. . . .	34
Figura 18 – Climatologia mensal da propriedade óptica do aerossol para a sensor MODIS a bordo do satélite AQUA de 2002 a 2023.	35
Figura 19 – Eficiência do efeito do aerossol mensal ($AEE, kWh/m^2/d/\tau$). . .	36

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

AS	América do Sul
AERONET	<i>AErosol RObotic NETwork</i>
AOD	<i>Aerosol Optical Depth</i>
CAMS	<i>Copernicus Atmosphere Monitoring Service</i>
DAOD	<i>Aerosol Optical Depth</i>
MEC	Massa Equatorial Continental
MODIS	<i>MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer</i>
MPA	Massa Polar Atlântica
MTA	Massa Tropical Atlântica
MTC	Massa Tropical Continental
MTM	Massa Tropical Marítima
m	Metros
μm	Micrômetro
nm	Nanômetro
PVLIB	<i>Python Photovoltaic (PV) Library</i>
ZCAS	Zona de convergência do Atlântico Sul
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

RESUMO	VII
LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS	IX
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo Geral	3
2.2 Objetivos Específicos	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 Aerossol	4
3.1.1 Fontes	4
3.1.2 Processo de Formação	5
3.1.3 Tamanho do Aerossol	5
3.1.4 Tempo de Residência na Atmosfera	6
3.2 Impacto do Aerossol no Sistema Climático	7
3.3 Climas do Brasil	8
3.4 Profundidade Óptica do Aerossol - AOD	10
4 DADOS E CLIMATOLOGIA	12
4.1 Dados utilizados	12
4.1.1 Dados de AOD da base do AERONET	12
4.1.2 Dados Meteorológicos de Satélites	13
4.1.3 Reanálise do CAMS	14
4.2 Climatologia	14
4.3 Relação Energia e Aerossol - PVLIB	15
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	17
5.1 Climatologia Observada e Derivadas dos Dados de Satélite e do CAMS	17
5.2 Variabilidade Espacial	21
5.3 Efeito do AOD no Potencial Solar	24
6 CONCLUSÃO	26

7	REFERÊNCIAS	27
	APÊNDICE A – CLIMATOLOGIA DO AEROSSOL MENSAL . .	33
	APÊNDICE B – EFICIÊNCIA DO EFEITO DO AEROSSOL MEN- SAL	36

1 INTRODUÇÃO

Os aerossóis são partículas sólidas ou líquidas (excluindo gotas de nuvens) suspensas na atmosfera (SEINFELD; PANDIS, 2006). Estes particulados possuem diâmetros que variam de alguns nanômetros a alguns micrômetros (SEINFELD; PANDIS, 2006; CORREIA et al., 2013; HORVATH, 2000). O processo de crescimento e formação dos aerossóis na atmosfera pode fornecer informações importantes sobre sua caracterização e seus possíveis impactos.

A formação dos aerossóis está diretamente relacionada com sua fonte (ALVES, 2005; FUZZI et al., 2006), que pode ser natural (como poeira do solo e do deserto, sal marinho dos oceanos, partículas de polens, vulcões, entre outros) ou antropogênicas (como emissões de poluentes por meio de indústrias e automóveis, queimadas e outros atos). Estas pequenas partículas podem interagir com o sistema climático, e modificá-lo tanto na escala global como também na escala local, impactar a produção de energias renováveis, como é o caso da energia solar e se inalados, alguns aerossóis podem ser prejudiciais à saúde (RUIZ-ARIAS et al., 2016). Os aerossóis afetam o clima e a produção de energia solar por meio da interação direta aerossol-radiação, e também pela interação secundária aerossol-nuvem.

É, portanto, imprescindível o estudo do impacto do aerossol no sistema climático. Tais estudos dependem de medidas que avaliam principalmente a concentração, o tamanho (diâmetro) e as propriedades físico-químicas dos aerossóis. Essas medidas são úteis para estudar as propriedades ópticas dos aerossóis na atmosfera (RAMANATHAN et al., 2001). Uma das principais informações que podem ser avaliadas é a profundidade óptica do aerossol (AOD, do inglês *Aerosol Optical Depth*) que é um indicativo da quantidade e da eficiência da extinção de radiação solar pela matéria opticamente ativa num dado comprimento de onda.

A climatologia de AOD é uma informação importante que auxilia na avaliação dos impactos dos aerossóis de modo geral. Uma grande parte desses trabalhos de climatologia utilizam dados derivados de satélite (REMER et al., 2008; VOSS; EVAN, 2020; SOUZA et al., 2020), dados observados da rede AERONET (PAIXÃO et al., 2008; MENEZES et al., 2018; REGMI et al., 2020) e recentemente dados de reanálise (XIAN et al., 2022). Song et al. (2021) realizaram uma climatologia de AOD de poeira (DAOD) derivado de medidas de satélite e avaliaram as tendências e as variabilidades interanuais do DAOD global. Yang et al. (2022) avaliaram o impacto dos aerossóis e das nuvens na geração de energia solar no Sul da China e norte da Índia, utilizando dados de AOD, os resultados mostraram diferenças no efeito das nuvens e dos aerossóis no potencial solar das duas regiões. No Brasil são encontrados alguns estudos regionais, como por exemplo, o trabalho de Menezes et al. (2018) que realizaram uma climatologia

de AOD e do Expoente de Angstrom para regiões de Floresta e Cerrado no Brasil, e Paixão et al. (2008) que realizaram uma climatologia de AOD para Amazônia, neste trabalho os autores encontraram parâmetros realistas para aplicação em estudos numéricos, porém os estudos são para um curto espaço de tempo e ambos utilizam dados da plataforma AERONET.

O Brasil é um país tropical de grande extensão geográfica, sendo o maior país da América do Sul, com uma área de 8.510.345,540 km² e uma população estimada de 213.317.639 habitantes (IBGE, 2023). Cerca de 92% de seu território está dentro da zona tropical e 8% dentro da zona subtropical causando diferentes características climáticas e nos padrões de circulação. A escala em que os efeitos dos aerossóis no sistema climático acontecem depende das concentrações de partículas na atmosfera, essas concentrações são controladas pelos processo de emissão e deposição. No Brasil os estudos apontam que a maior carga de aerossol é observada na estação seca (YAMASOE et al., 1998; MARTINS et al., 1998; ROSENFELD, 1999; ARTAXO et al., 2002; ARTAXO et al., 2006), quando a taxas de deposição úmida são reduzidas e as emissões são maiores, estas, principalmente pelo aumento do número de queimada (COUTINHO et al., 2002; ARAGÃO et al., 2013; ROSÁRIO et al., 2011; CATAÑO, 2021). Com uma maior carga de aerossol na atmosfera e a redução dos processos de deposição, o transporte de partículas para longas distâncias deve ganhar destaque. Para compreender esse efeito é preciso relacionar as variações climáticas e os aerossóis.

Portanto, este trabalho tem como objetivo realizar uma climatologia de AOD para as diferentes regiões do Brasil, e responder a seguinte questão: Como a climatologia de AOD se relaciona com a variabilidade climática do Brasil?. Como aplicação deste estudo, visto o crescimento da produção de energia solar no Brasil, também será avaliado o impacto direto dos aerossóis no potencial solar, o intuito será avaliar somente o efeito direto do aerossóis no potencial solar, não será incluído o efeito secundário, referente às nuvens. Considerando a baixa cobertura espacial de medidas in-situ, o trabalho será desenvolvido utilizando dados de AOD derivados de satélite, reanálise e medidas obtidas da rede AERONET.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Realizar a climatologia do AOD para o Brasil no período de 2000 a 2022.

2.2 Objetivos Específicos

Analisar e caracterizar a relação da climatologia do AOD com a variabilidade climática do Brasil.

Comparar e relacionar os dados do AOD derivados de satélites, reanálises e observações.

Analisar os padrões médios e sazonais do AOD no Brasil.

Avaliar o impacto do aerossol no potencial energético brasileiro.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Aerossol

Aerossóis são minúsculas partículas suspensas na atmosfera. O termo "aerossol" é derivado do grego "aero", que significa ar e "sol", que significa solução. Atualmente, a palavra ganhou ênfase, tornando-se tópicos de discussão e relacionando com diversas áreas do conhecimento como medicina, engenharia, físico-química e em campos ambientais como a meteorologia. A meteorologia que busca identificar a relação e o efeito do particulado na atmosfera. A primeira classificação do termo aerossol se deu por Schummauss em 1920, que caracterizava o aerocolóide como suspensões relativamente estáveis de partículas sólidas ou gotículas dispersas em um gás com dimensões inferiores a 100 micrômetros, porém com tamanho superiores aos das moléculas individualizadas (RENOUX; BOULARD, 1998).

No decorrer dos anos, pesquisadores buscaram compreender o efeito do aerossol no sistema climático. O aerossol atmosférico é constituído de partículas suspensas na atmosfera com diâmetro variando desde alguns nanômetros até dezenas de micrômetros. Estas partículas podem apresentar diversos formatos e composições diferentes, pois dependem da fonte emissora e dos processos que sofrem na atmosfera (SEINFELD; PANDIS, 1998; ALVES, 2005; FREITAS et al., 2005; SEINFELD; PANDIS, 2006; ARTAXO et al., 2006; FIELD et al., 2012). Portanto, caracterizar o aerossol é um trabalho árduo, pois uma partícula pode se enquadrar em diferentes classificações dependendo dos critérios utilizados. As principais formas para se caracterizar um aerossol incluem determinar a composição química, a fonte emissora, o tamanho das partículas (diâmetro), e o tempo de residência na atmosfera. Além de ser uma atividade complicada é de extrema importância, pois as concentrações e as características dos aerossóis podem modular as propriedades térmicas, ópticas e químicas da atmosfera, e portanto, gerar feedbacks no sistema climático (ARTAXO et al., 2006; PALÁCIOS et al., 2016).

3.1.1 Fontes

Os aerossóis são divididos em primários e secundários. As partículas primárias ocorrem por emissão direta da superfície, enquanto as partículas secundárias são formadas na atmosfera pelo processo de conversão gás partículas (ALVES, 2005). É necessário ainda classificar as suas fontes em naturais, (90% dos aerossóis), e antropogênicas (10% dos aerossóis) (KINNE et al., 2006; TEXTOR et al., 2006; CARBONI et al., 2012). As emissões naturais são processos que ocorrem na atmosfera, sem a influência humana, sendo a liberação de poeira, pólen e sal marinho na atmosfera. Já

as emissões antrópicas são derivadas principalmente de queimadas na estação seca (meses de julho a setembro) no Brasil (ARTAXO et al., 2006; BDQUEIMADAS, 2023). Os aerossóis antropogênicos têm ganhado destaque devido ao aumento das emissões antropogênicas causadas pelo crescimento da população, urbano e industrial.

3.1.2 Processo de Formação

Os aerossóis também podem ser tratados pelo seu processo de formação, a primeira classificação é referente ao aerossol ser emitido diretamente para a atmosfera (primário) ou ser formado na atmosfera (secundário). Os primários podem ocorrer pela ação da erosão dos ventos sobre o solo e superfície oceânica (ou seja, a partícula é despreendida da atmosfera pela ação dos ventos). Os aerossóis secundários são formados na atmosfera, geralmente pelo processo de conversão gás partículas (processo que se dá pelas reações químicas dos poluentes com a atmosfera ou pela atuação como aparato de nucleação e condensação de produtos gasosos) (ALVES, 2005).

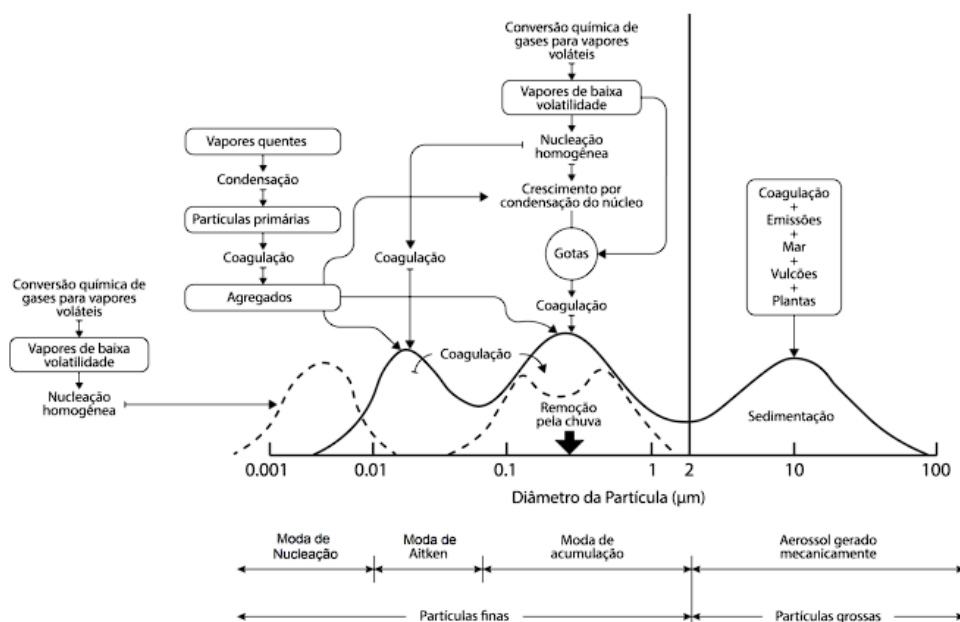
Os aerossóis secundários são subdivididos em três categorias, sendo nucleação, condensação e coagulação para englobar suas particularidades (GONÇALVES et al., 2021). Os de nucleação se dão pelo processo em que as moléculas gasosas ou átomos se agrupam para formar partículas sólidas ou líquidas, em condições de alta umidade e presença de núcleos de condensação. Já a condensação ocorre quando vapores na atmosfera se transformam em partículas líquidas ou sólidas, quando o vapor atinge um ponto de saturação ou quando entra em contato com superfícies de condensação. E a coagulação ocorre quando vapores na atmosfera se transformam em partículas líquidas ou sólidas, pelo vapor atingir um ponto de saturação ou entrar em contato com superfícies de condensação.

3.1.3 Tamanho do Aerossol

Conforme a Figura 1, obtém-se uma classificação detalhada dos aerossóis perante o seu tamanho e a sua moda (WHITBY et al., 1976; SEINFELD; PANDIS, 2006). Particulados com diâmetro menor que $2,5\ \mu\text{m}$ são conhecidos como partículas finas ou moda fina e moda de acumulação. Os aerossóis na moda fina podem ser divididos ainda em: moda de nucleação ($< 0,01\ \mu\text{m}$) e moda de Aitken ($0,01$ a $0,1\ \mu\text{m}$), esta última caracterizada por aerossóis formados pela condensação de vapores derivados da combustão e nucleação de gases voláteis. Os aerossóis classificados na moda de acumulação ($0,1$ a $2,5\ \mu\text{m}$) podem ser inalados, porém não impactam a saúde como as finas. Essas partículas são formadas a partir do crescimento por coagulação e condensação dos núcleos de Aitken. O tempo de residência dessas partículas na atmosfera é de alguns dias devido à sedimentação e coagulação serem baixas.

Os particulados com diâmetro maiores que $2,5\ \mu\text{m}$ são conhecidos como partículas grossas ou de moda grossa, eles são produzidos mecanicamente, como por exemplo a ação do vento, possuem um tempo menor de residência na atmosfera devido a ação da gravidade.

Figura 1 – Esquema da distribuição de tamanhos dos aerossóis atmosféricos e os processos que influenciam cada fração de tamanho de partículas.



Fonte: Readaptada e extraída de Seinfeld; Pandis (2006); adaptado de Whitby et al. (1976).

Os limites numéricos considerados acima podem variar dependendo da literatura, porém a definição por nomes é muito importante devido às características de cada faixa e como cada uma influencia no ambiente, no clima e na saúde. Proveniente da classificação numérica deriva-se duas nomenclaturas, o $\text{PM}_{2,5}$ e PM_{10} , utilizado para definir o impacto na atmosfera.

3.1.4 Tempo de Residência na Atmosfera

O tempo de crescimento e de residência do aerossol na atmosfera é curto, podendo variar de dias a semanas. A partir do momento que os aerossóis estão disponíveis na atmosfera ocorrem processos de envelhecimento até que a partícula seja removidas. O crescimento e evolução de um PM se dá pelos processos de coagulação com outros particulados ou pela condensação de espécies de vapor (RAES et al., 2000; HOLMES, 2007).

Após permanecer na atmosfera durante algum tempo, geralmente alguns dias o aerossol é removido. Esse processo pode acontecer por deposição seca ou úmida. Esse padrão é responsável por tornar a atmosfera limpa, controlar a concentração de aerossóis na troposfera e reciclar os nutrientes para os ecossistemas aquáticos e terrestres (GUENTHER et al., 1995; ARTAXO et al., 2002; ARTAXO et al., 2006) .

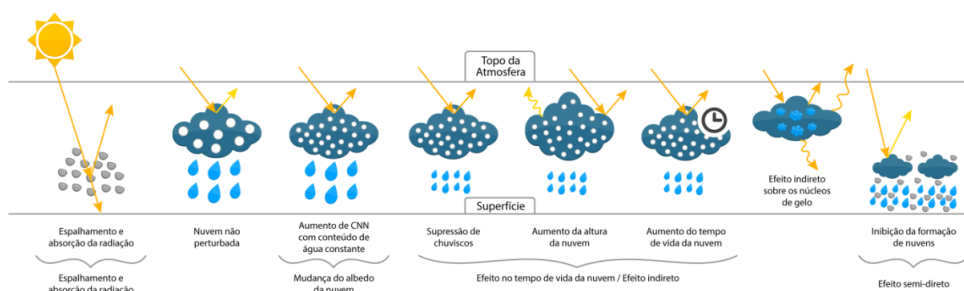
Conforme Seinfeld; Pandis (2006) a eficiência da deposição depende das propriedades físico-químicas e da região onde o aerossol se encontra . A deposição seca é dada pelo movimento do ar para a terra (movimento descendente) sem a presença de precipitação. Ocorre pela sedimentação, movimentos inerciais ou por turbulência (WESELY; HICKS, 2000). Já a deposição úmida está relacionada à interação do aerossol com o vapor d'água na atmosfera. Neste caso o aerossol atua como núcleo de condensação de nuvens (CCNs), do inglês *Cloud Condensation Nuclei*). Quando ocorre a precipitação as gotas de nuvens tem o potencial de limpar a atmosfera (WALLACE; HOBBS, 2006).

3.2 Impacto do Aerossol no Sistema Climático

O aerossol em suas diversas propriedades microfísicas e composições químicas, possuem um grande potencial para impactar o tempo e o clima (PEREIRA et al., 2006). A alteração pode ser direta (por absorção e espalhamento da radiação solar), semidireta (alterando a termodinâmica atmosférica e a formação de nuvens), e de forma indireta (alterando a microfísica das nuvens) (TWOMEY, 1977; ALBRECHT, 1989; KAUFMAN; NAKAJIMA, 1993; PINCUS; BAKER, 1994; KOREN et al., 2004; SEINFELD; PANDIS, 1998; ARTAXO et al., 2006; FERNANDES, 2018).

Em todos os casos os aerossóis podem modular o balanço de radiação global e regional (ANDREAE; ROSENFELD, 2008). A Figura 2 ilustra a interação direta e os vários feedbacks esperados para a interação secundária.

Figura 2 – Readaptação do diagrama esquemático mostrando os efeitos radiativos dos aerossóis e nos mecanismos de formação e desenvolvimento de nuvens.



Fonte: Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, IPCC (2007)

O efeito direto dos aerossóis no clima ocorre por meio da absorção ou do espalhamento da radiação nos espectros solar e terrestre, podendo resultar no aquecimento ou resfriamento da superfície. Também pode impactar na visibilidade, já que pode interagir com o espectro de radiação visível, a alteração da termodinâmica atmosférica são classificados como efeito semidireto no clima, pela absorção direta e a dispersão da radiação ocasionada pelo aerossol verifica-se uma redução na cobertura de nuvens que aumenta o fluxo radiativo nas camadas (reduz o barramento para entrada com isso insere mais radiação na superfície, contribuindo para o aumento de energia no sistema). Indiretamente o aerossol afeta os padrões climáticos pela modificação nas propriedades microfísicas das nuvens. Estes efeitos são subdivididos em duas classes: A primeira analisa o aumento de Núcleos de Condensação das Nuvens (CCNs) que resulta em um número maior de gotículas, do conteúdo de água e do albedo da nuvem. O segundo refere a alterações induzidas pelas mudanças na propriedade da altura da nuvem, podendo ser supressão de chuva, aumento na altura e em seu ciclo de vida.

3.3 Climas do Brasil

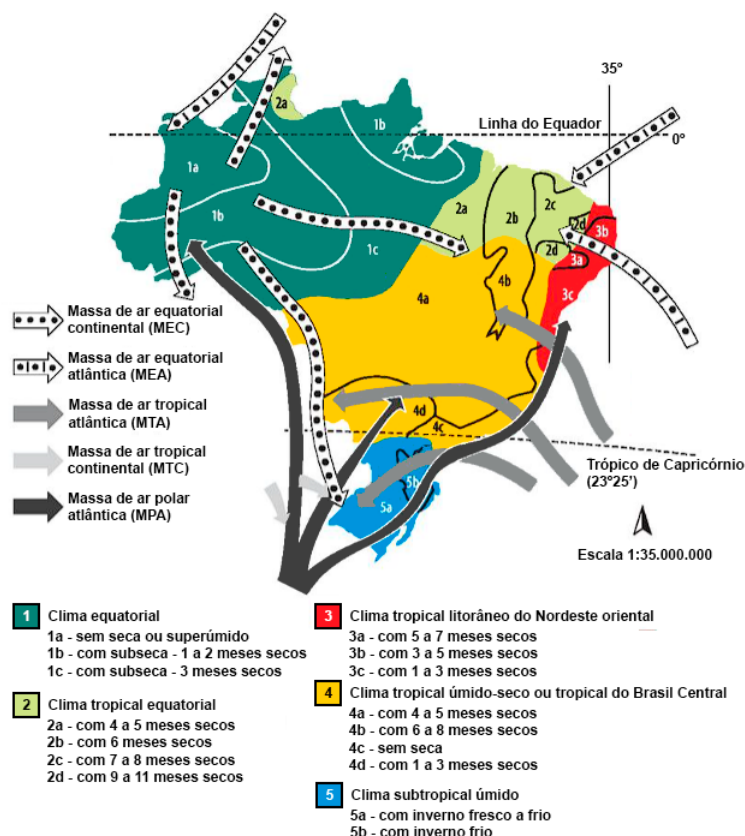
O Brasil é um país extremamente vasto, sendo o quinto maior do mundo em área total e o maior da América do Sul. Está localizado entre a linha do equador e a linha de capricórnio, portanto recebe uma intensa e constante incidência de luz solar ao longo do ano. São esperados temperaturas elevadas Consequentemente é propício para altas temperaturas e uma alta umidade pela zona de convergência intertropical (ZCIT) e a zona de convergência do atlântico sul (ZCAS), além da grande faixa costeira.

Apesar do Brasil ser um país tropical observa-se uma grande variedade climática, dada pela sua diversidade de vegetação (que altera a evapotranspiração e o balanço de radiação), o seu vasto relevo (com regiões de depressões e locais com cadeias montanhosas), pela extensão territorial (cerca de 8.510.345,540 km² IBGE (2023)), sua localização geográfica (com forma de um triângulo invertido, que é maior no equador e afunila próximo aos trópicos até o sul), as dinâmicas das massas de ar e frentes (com áreas onde as frentes chegam e perduram por mais tempo do que outros e depende do tipo de massa que interage podendo ser equatorial (continental e atlântica), tropical (continental e atlântica) e a polar atlântica) e os efeitos de maritimidade/continentalidade (um litoral extenso banhado por águas quentes por estar localizado a oeste da bacia e regiões interioranas que não tem efeitos diretos do mar), conforme o livro Climatologia: noções básicas e climas do Brasil, Mendonça; Danni-Oliveira (2017) e Tempo e Clima no Brasil, Cavalcanti (2016).

Portanto, dentro de uma região extremamente tropical observa-se climas variados, indo desde de um clima equatorial úmido até o clima semiárido seco. Dentro

destas principais classificações observa-se outras ramificações, porém para o trabalho considera que somente os seis macro-tipos apresentados na Figura 3 serão suficientes para as análises.

Figura 3 – Domínios climáticos do Brasil e principais subtipos.



Fonte: Climatologia: noções básicas e climas do Brasil, Mendonça; Danni-Oliveira (2017)

O Clima Equatorial está presente na parte norte do Brasil (compreendida pelos estados do Amazonas, Pará, Acre, Rondônia, Amapá, e parte do Mato Grosso e Tocantins, coincidindo com a floresta Amazônica). Esta região é controlada pelas massas de ar equatorial continental e atlântica, além da ZCIT. O clima nesta região é úmido e com uma homogeneidade térmica elevada, possuindo uma intensa nebulosidade ocasionada pela convergência na localidade. Apesar de ser uma região com uma alta umidade no ano todo, a precipitação é dada por uma distribuição heterogênea tanto espacialmente quanto temporal, diferente de outros climas do Brasil o período chuvoso é representado nos meses de inverno.

O Clima Tropical Equatorial distribui-se por partes das Regiões Norte (centro norte do estado do Tocantins) e Nordeste (quase todo o estado do Maranhão, parte dos estados do Piauí, Bahia, Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte, e todo o estado do Ceará). Este é um clima quente e com variações úmidas e semi-úmidas. Tem a ZCIT

presente no extremo norte da região, ao passo que as massas MEC, MEAN, MEAS, MTA e MPA atuam na porção centro-sul da área. Está associado à floresta amazônica e à caatinga, denominada mata de cocais. Com uma precipitação com índices elevados predominantemente nos meses de verão, porém dentro do clima possui regiões com meses seguidos mais chuvosos e meses com poucos meses.

O Clima Tropical Litorâneo do Nordeste Oriental é uma faixa de terras que se estende do litoral atlântico oriental do Nordeste até adentrar ao continente, influenciado pelas massas de ar úmidas vindas do oceano Atlântico (MEAS, MTA e MPA) e pelo ramo da ZCIT, tornando um clima específico para esta região. A particularidade da área é dada pelo clima úmido e quente, a concentração da pluviosidade está presente no final do verão e o inverno com ênfase no outono.

O Clima Tropical Úmido-Seco ou Tropical do Brasil Central está na área "core" do cerrado e Centro-oeste brasileiro, pela sua localização é controlado por sistemas atmosféricos equatoriais (MEC) e tropicais (MTA e MTC) além de contar com a atuação extratropical (MPA). Pela ação de diversos sistemas possuem uma variedade de tipos de tempo durante o ano, produzindo verões quentes e úmidos, no inverno observa-se uma seca e temperaturas amenas com quedas pontuais de temperatura. Com uma expressiva sazonalidade e divididas em duas estações observa-se uma tropicalidade.

O Clima Subtropical Úmido é predominantemente no Sul do Brasil, esta região é controlada pelas massas de ar tropicais e polares (MTA, MTC e MPA), sendo predominantemente úmido das costas orientais e subtropicais dominados largamente pela massa tropical marítima (MTm). A MEC atua auxiliando na caracterização do verão, além de ser uma região de inserção constante de sistemas frontais ao longo do ano que auxilia em um alto índice pluviométrico e constante. Por estar fora da área tropical, as temperaturas não são tão elevadas, porém no inverno tende a cair ainda mais.

3.4 Profundidade Óptica do Aerossol - AOD

A profundidade óptica do aerossol (τ) é um indicativo da quantidade e da eficiência da extinção de radiação solar pela matéria opticamente ativa num dado comprimento de onda e é importante na caracterização da carga de aerossóis das regiões estudadas, e na forçante radiativa direta nestes locais (PAIXÃO, 2011).

A profundidade óptica do aerossol é derivada a partir da Lei de Beer-Bouguer Lambert que descreve a atenuação de um feixe monocromático de radiação ao atravessar um meio homogêneo, que é modelada para corrigir a distância Terra-Sol e adaptada devido à presença dos constituintes atmosféricos, como o espalhamento molecular, os aerossóis e os gases atmosféricos (OLMEDA et al., 2005).

$$\tau = -\frac{1}{m} * \ln\left(\frac{I}{I_o}\right) \quad (3.1)$$

Sendo I a irradiância no detector, I_o é a irradiância extraterrestre, m a massa óptica é definida como a razão entre a profundidade óptica na vertical e profundidade óptica em outra direção.

4 DADOS E CLIMATOLOGIA

4.1 Dados utilizados

Para o presente estudo foi utilizado uma série climática de 2000 a 2023 da propriedade óptica dos aerossóis. Esse período foi selecionado pela disponibilidade de dados. A coleta de dados de aerossóis em superfície é de alto custo. São necessários equipamentos especializados e sensíveis e que ainda necessitam de manutenção frequente. Além disso, estão passíveis a falhas, interrupções das medidas e a distribuição espacial é baixa e não uniforme.

Analisando espacialmente a distribuição das estações na Figura 4, observa-se a falta de dados em algumas regiões do Brasil, portanto tornou-se necessário a inserção de dados de satélites e reanálises para cobrir o país nas faixas temporais e espaciais. Os dados de reanálises do CAMS serão usados como o dado principal pela saídas geradas com grande complexidades, já os dados de AOD derivados de satélites pelo plataforma do GIOVANNI e os dados da AERONET ajudaram a completar o conjunto e comparar os dados, podendo analisar o padrão e a veracidade dos modelos.

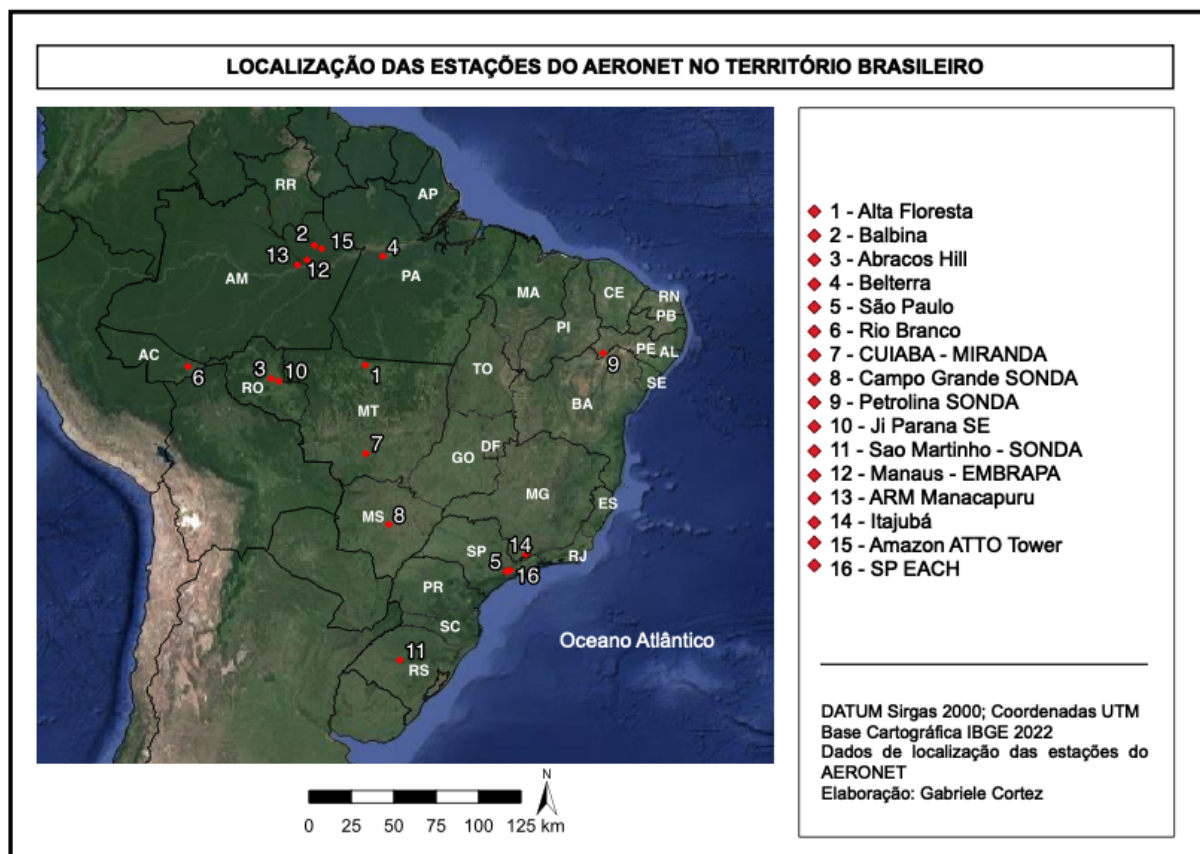
4.1.1 Dados de AOD da base do AERONET

A *AErosol RObotic NETwork* (AERONET) é uma rede mundial de dados de aerossóis criada e fomentada pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA). Essa rede de sensores foi projetada e implantada na década de 90, com intuito de monitorar o material particulado por meio de fotômetros solares espectrais, visando a quantificação e caracterização das propriedades dos aerossóis atmosféricos, permitindo aplicá-los em estudos ambientais (HOLBEN et al., 1998). Atualmente é a maior base de dados do mundo, instalada em mais de 200 lugares no mundo. No Brasil estão disponíveis ou já estiveram em algum momento cerca de 55 no estações, porém somente 16 possuem série temporal longa o suficiente, destas sendo 5 estão localizadas na Bacia Amazônica, com registros regulares desde 1999.

No portal da AERONET (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>) é possível obter os dados e informações dos produtos. A descrição completa da plataforma e dos dados são percorridos por Holben et al. (1998). Os produtos da AERONET são fornecidos em três níveis de qualidade: o nível 1.0 inclui todos os dados gerados, podendo ter a presença de nuvens, nível 1.5 que possui uma análise automática prévia remove os dados contaminados por nuvens e o nível 2.0 que são dados com qualidade e precisão a partir de uma aferição da calibração dos instrumentos feita pela NASA. Os dados de profundidade óptica do aerossol são fornecidos em função do comprimento de onda (340, 380, 440, 500, 675, 870, 940 e 1020 nm.), em intervalos de 15 minutos e são

obtidas pela faixa espectral de a , Buscando o melhor andamento e resultados para o trabalho serão utilizados dados de 500 nm e do nível 2.0 para 16 municípios que possuem dados contínuos conforme Figura 4.

Figura 4 – Localização das estações do AERONET no território Brasileiro.



Fonte: Autoria própria, base de dados do AERONET (2023).

4.1.2 Dados Meteorológicos de Satélites

Os dados de satélite são uma base importante de informações para analisar e relacionar o material particulado atuando na atmosfera, pela velocidade e movimentação do satélite é possível monitorar regiões onde não tem dados e obter dados horários em uma larga escala. Portanto, os satélites são necessários para estudos dos particulados resolvendo um grande problema dos dados observados que é a baixa distribuição espacial e temporal dos aerossóis em diferentes escalas e bandas espectrais. A bordo dos satélites é possível colocar sensores que registram informações importantes. Para o trabalho será utilizado o Terra e o Aqua, pois eles possuem a bordo o sensor MODIS (*MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer*). Este sensor auxilia nos trabalhos de identificação dos aerossóis fornecendo informações sobre a distribuição, diâmetro, composição e concentração na atmosfera

Estes dados fornecem uma cobertura global e temporal completas (dadas em células de 1 por 1 grau em uma grade de ângulos iguais que abrange 24 horas e, em seguida, resumidas no globo). O produto contém aproximadamente 800 conjuntos de dados estatísticos derivados do produto global sendo encontrados em dados diários ou mensais. Os dados estão disponíveis em (<https://disc.gsfc.nasa.gov/>) pela plataforma do GIOVANNI da NASA e podem ser encontrados as descrições completas dos dados.

Para o trabalho serão considerados os dados de profundidade óptica dos aerossóis mensais sobre o continente, que define o tipo de partícula, e sobre o oceano, que evidencia o tamanho da partícula e sua distribuição. Será utilizado o AOD em 550 nm derivados dos satélites AQUA (MYD08_M3_V6) e TERRA (MOD08_M3_V6) para realizar cálculos mensais para a série descritos na climatologia.

4.1.3 Reanálise do CAMS

O Serviço de Monitoramento da Atmosfera do Copernicus (CAMS) fornece dados e informações contínuas sobre a composição da atmosfera, tendo cinco domínios principais, sendo a qualidade do ar e a composição atmosférica, a camada de ozônio e radiação ultravioleta, emissões e fluxos de superfície, radiação solar e forçante climática.

Os dados provenientes das reanálises do CAMS incluem uma ampla gama de variáveis atmosféricas, como temperatura, umidade, vento, pressão, altura geopotencial, concentrações de gases atmosféricos, incluindo poluentes, aerossóis e ozônio, e a composição química da atmosfera, conforme a documentação encontrada no site (<https://ads.atmosphere.copernicus.eu/>).

As reanálises do CAMS (*Copernicus Atmosphere Monitoring Service*) são conjuntos de dados que fornecem informações detalhadas sobre a composição da atmosfera terrestre e seu estado ao longo do tempo. Esses conjuntos de dados são gerados por meio de modelos numéricos que combinam dados observacionais, como medições de satélite e estações de monitoramento, com algoritmos matemáticos para produzir uma representação coerente do clima e das condições atmosféricas.

Neste trabalho foram utilizados os dados diários da profundidade óptica total do aerossol a 550 nm e 700 nm, dados para composição do vento sendo a componente zonal e meridional do vento a 10m que estava em conjuntos mensais.

4.2 Climatologia

O objetivo principal da pesquisa é calcular a climatologia do AOD para o Brasil. Para as cidades cujas séries temporais de AOD foram grandes o suficiente foi feita uma

comparação entre as observações e os dados estimados por satélite e da reanálise. Foram usados o período 2000-2022 para calcular a climatologia. Os dados foram dispostos em médias mensais e assim calculadas as climatologias sazonais e mensais. Os dados foram processados utilizando as bibliotecas do Python (MARTINS et al., 2022).

Os dados obtidos da plataforma AERONET são disponibilizados no formato *lev20*, análogo ao csv, logo é possível utilizar a biblioteca Pandas (MCKINNEY, 2010) para realizar a leitura dos arquivos e assim possibilitar seu processamento. Durante o processo de análise dos dados provenientes do GIOVANNI/NASA, os dados vem no formato *hdf* (*Hierarchical Data Format*), para a leitura dos mesmos e devido processamento, foi necessária a utilização da biblioteca PyHDF (PyHDF - Science Team, 2023), que fornece opções para trabalhar com arquivos desse formato. Por último, no caso da reanálise ofertada pelo CAMS, os dados são disponibilizados no formato *nc*, onde é possível montar *datasets* utilizando a biblioteca *xArray* (HOYER; HAMMAN, 2017), facilitando inclusive a agregação e cálculo de médias.

Para a plotagem dos mapas com os respectivos dados, foram utilizadas as bibliotecas *Matplotlib* (HUNTER, 2007) e o *Cartopy* (Met Office, 2010 - 2015).

4.3 Relação Energia e Aerossol - PVLIB

A investigação e a utilização de energias limpas e renováveis tornaram-se uma questão importante, especialmente para os países em desenvolvimento, para satisfazer a necessidade de um rápido crescimento populacional e econômico (REZENDE, 2019). Para avaliar o efeito dos aerossóis no potencial solar foi utilizado a biblioteca PVLIB (HOLMGREN et al., 2018). O PVLIB refere-se ao *Python Photovoltaic (PV) Library*, que é uma biblioteca de código aberto escrita em Python para modelagem e simulação de sistemas fotovoltaicos. Essa biblioteca fornece ferramentas para trabalhar com dados meteorológicos, modelar a geração de energia solar fotovoltaica e realizar análises de desempenho de sistemas fotovoltaicos. Ele inclui métodos para calcular a radiação solar incidente, modelar a produção de energia solar, e também incorpora modelos para considerar diversos fatores que afetam a geração de energia, como sombreamento, inclinação e orientação dos painéis solares, entre outros. Aqui foi utilizado a versão 0.7.2 (YANG et al., 2022).

Utilizou-se a função `get_clearsky` e o modelo `simplified solis` para estimar a radiação. O método `get_clearsky` é uma função da biblioteca `pvlb` em Python e é utilizado para estimar a irradiação solar global (GHI), a irradiação solar direta normal (DNI) e a irradiação solar difusa horizontal (DHI) em uma localidade específica durante um período de tempo específico. Essa função modela o céu claro para a localidade

fornecida e retorna os valores previstos para GHI, DNI e DHI. Estimamos a radiação de céu limpo, sem aerossol e com aerossol. Nesse caso, consideramos a climatologia mensal. As estimativas de radiação direta e difusa permitiram determinar a irradiância potencial máxima POAI que pode ser transformada em energia elétrica. Foi levantado o POAI horário considerando o efeito dos aerossóis e sem os aerossóis.

Para realizar esses cálculos foi necessário inserir algumas informações da região para modelar a estimativa de perda, foi incorporado o ângulo de azimute que informa a direção ao longo do horizonte para onde o painel está voltado e o ângulo de inclinação ideal que considera as latitudes, indicando a proporção ideal. Além do ângulo (φ) que denota a latitude do sistema fotovoltaico em graus, conforme a Figura 5.

Figura 5 – Ângulo de inclinação ideal (θ).

$$\theta = \begin{cases} \varphi \times 0.87, & \varphi < 25^\circ \\ \varphi \times 0.76 + 3.1, & 25^\circ \leq \varphi \leq 50^\circ \\ \varphi, & \varphi > 50^\circ \end{cases}$$

Fonte: Inclinação ideal de painéis solares conforme Landau (2017).

A modelagem do PVLIB, consiste em duas etapas a primeira denominada DIF calcula a diferença entre o POAI sem AOD e o POAI com AOD obtendo esse padrão e tendo o resultado calcula-se a eficiência do efeito do aerossol que é a razão entre a diferença dos POAI sobre o POAI de 550 nm, conforme as equações abaixo mostram.

$$DIF = POAI_{NOAOD} - POAI_{AOD} \quad (4.1)$$

$$AEE = \frac{DIF}{POAI_{550}} \quad (4.2)$$

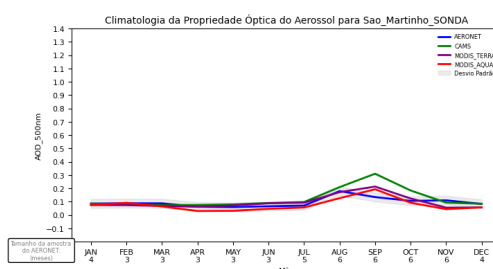
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Climatologia Observada e Derivadas dos Dados de Satélite e do CAMS

Como as fontes, tipos e carga de aerossóis que persistem em todo o vasto território brasileiro são bastante heterogêneos foi avaliado em um primeiro momento a aderência da climatologia extraída das diferentes fontes de dados avaliadas neste trabalho, portanto, optou-se por apresentar os resultados por regiões. De modo geral observou-se similaridade entre as climatologias observadas e as estimativas por satélite e derivadas da reanálise. Os maiores valores de AOD climatológico foram observados na estação de transição entre o inverno e o verão, devido ao maior número de ocorrências de queimadas (MARTIN et al., 2010; SILVEIRA et al., 2020).

A região Sul e Nordeste possuem somente uma estação de dados disponível na plataforma da AERONET. Na região Sul são observados os maiores nos meses de julho a outubro, Figura 6, com tendência de superestimativa dos dados do CAMS. Os valores máximos da climatologia do AOD derivados dos dados obtidos da AERONET são observados no mês de agosto, enquanto os dados de satélite e da reanálise indicam o pico máximo em setembro. A frequente passagem de sistemas frontais pela região e outros eventos de precipitação contribuem para a rápida limpeza da atmosfera.

Figura 6 – Região Sul.

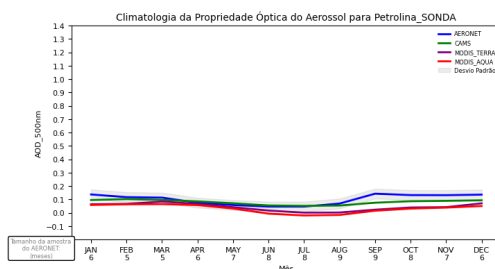


Fonte: Autoria própria, base de dados do AERONET (2023).

Na região Nordeste é observada apenas uma ligeira mudança no AOD climatológico durante o ano, Figura 7, observa-se apenas com um leve aumento na primavera. De modo geral, os valores observados no nordeste são os menores no Brasil. Um estudo de 2019 também destacou o cenário de baixo aerossol e consequentemente pequenos valores de AOD para o Nordeste do Brasil valores (OLIVEIRA, 2019). A climatologia derivada dos dados de satélite e da reanálise tendem a subestimar o AOD observado. Os dados de Petrolina, Figura 7, indicam valores menores que as concentrações médias para todo o Nordeste ($AOD \approx 0,2$) encontradas por (OLIVEIRA,

2019). Destaca-se aqui que a região Nordeste que possui um dos maiores potenciais para geração de energia solar do Brasil, baixa cobertura de nuvens e concentração de aerossol (resumida em valores baixos de AOD) e grande disponibilidade de radiação solar.

Figura 7 – Região Nordeste.

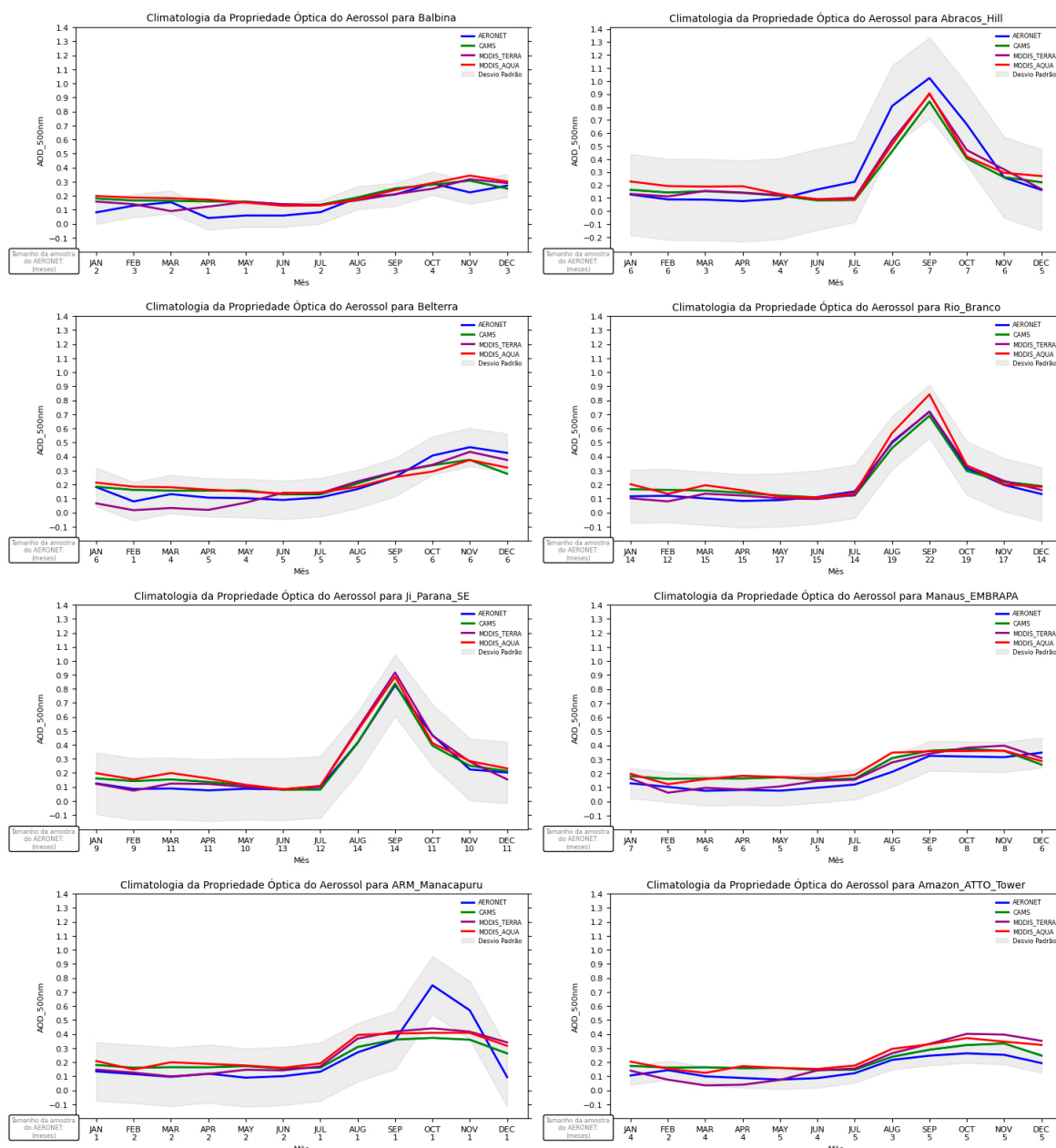


Fonte: Autoria própria, base de dados do AERONET (2023).

A região Norte do Brasil é de extrema importância para o clima do Brasil, e possui a maior floresta tropical do mundo. As climatologias avaliadas apresentam comportamentos distintos: “Abracos Hill”, “Rio Branco”, “Manacapuru” e “Ji Paraná SE” apresentam picos bastante elevados de AOD, indicando uma carga maior de aerossol enquanto “Balbina”, “Balterra” “Embrapa” e “ATTO” apresentam valores menores de AOD. As localidades “Abracos Hill”, “Rio Branco”, “Manacapuru” e “Ji Paraná SE” estão concentradas na região do arco do desmatamento, marcadas por elevado número de queimadas durante a primavera. As localidades “Balbina”, “Balterra” “Embrapa” e “ATTO” são consideradas regiões de background. As massas de ar que se deslocam até essas regiões percorrem vastas áreas de floresta desde a costa sem interagir com fontes importantes de poluição.

As principais cargas de aerossol são derivadas das emissões biogênicas da floresta e eventualmente do transporte externo de poeira e material de queimada da África e sal marinho do oceano (WANG et al., 2020). A variação do AOD nas regiões de maior concentração de aerossol são maiores se comparadas às regiões de background, desvio padrão maior. Isso nos permite inferir que as mudanças nas taxas de remoção, emissão e formação de aerossol são bastante intensas. As climatologias derivadas dos dados de satélite e da reanálise estão de modo geral dentro da região do desvio o que indica uma boa representação das principais variações. As maiores diferenças são observadas no local “Abracos Hill” e “Manacapuru”. Em ambos os locais as climatologias extraídas dos dados de satélite e da reanálise tendem a subestimar o AOD. De modo particular Manacapuru possui as maiores diferenças que podem ser explicadas pela baixa cobertura temporal de medidas e também pelo fato de a região de Manacapuru ser fortemente influenciada pela poluição de Manaus (MARTIN et al., 2016; RAFEE et al., 2017; NASCIMENTO et al., 2021), um fator local.

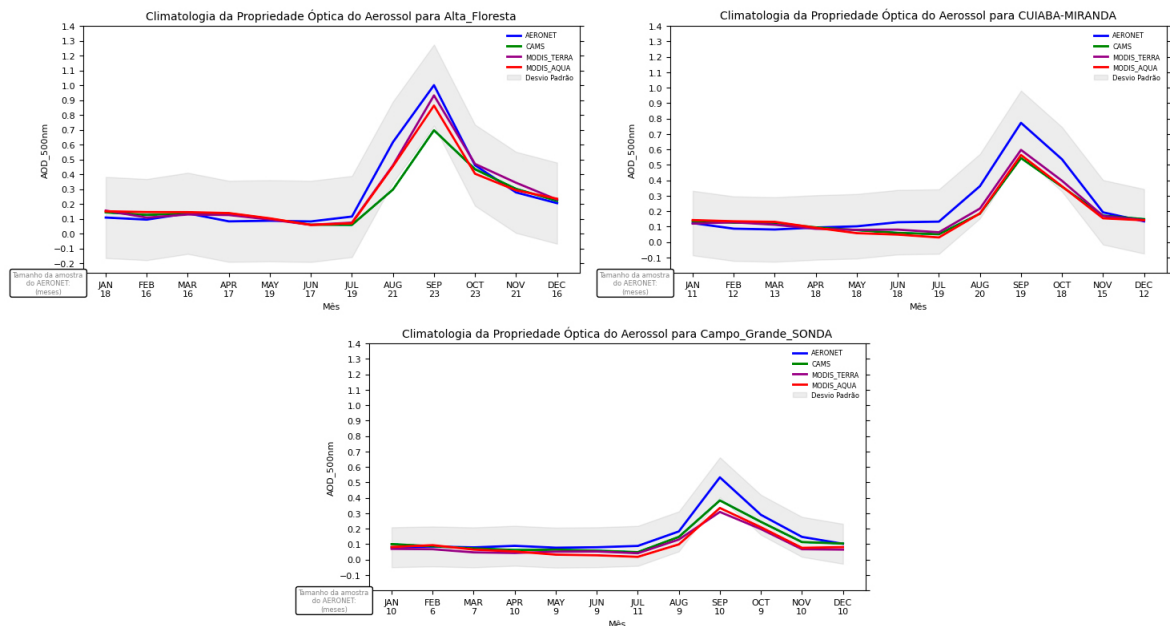
Figura 8 – Região Norte.



Fonte: Autoria própria, base de dados do AERONET (2023).

A região Centro-Oeste está dentro do arco do desmatamento o que justifica os valores mais elevados de AOD do país. Além disso, o transporte da região Norte, caracterizado pelo deslocamento das massas de ar equatorial continental também favorecem o transporte de aerossóis para a região. De modo geral a climatologia derivada dos dados de satélite e do CAMS tendem a subestimar as observações. Na região de Cuiabá (Mato Grosso), os incêndios florestais e a queima de biomassa em áreas urbanas são comuns (principalmente para limpeza de terrenos e queima de lixo) e se intensificam durante a estação seca.

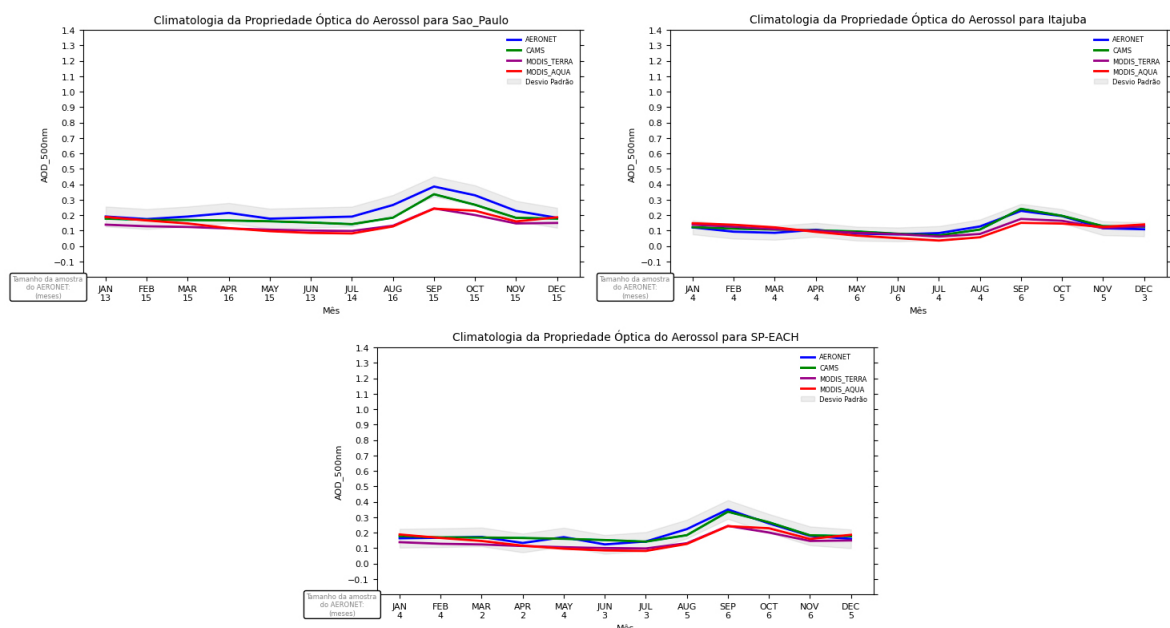
Figura 9 – Região Centro-Oeste.



Fonte: Autoria própria, base de dados do AERONET (2023).

Na região Sudeste é possível observar os maiores valores de AOD entre os meses de agosto e novembro. Deve-se considerar que durante o outono é observado o maior número de queimadas na região sudeste e também eventos de transporte de fumaça da região central da América do Sul (TARGINO et al., 2019). Essas características contribuem para o aumento do AOD nesse período.

Figura 10 – Região Sudeste.

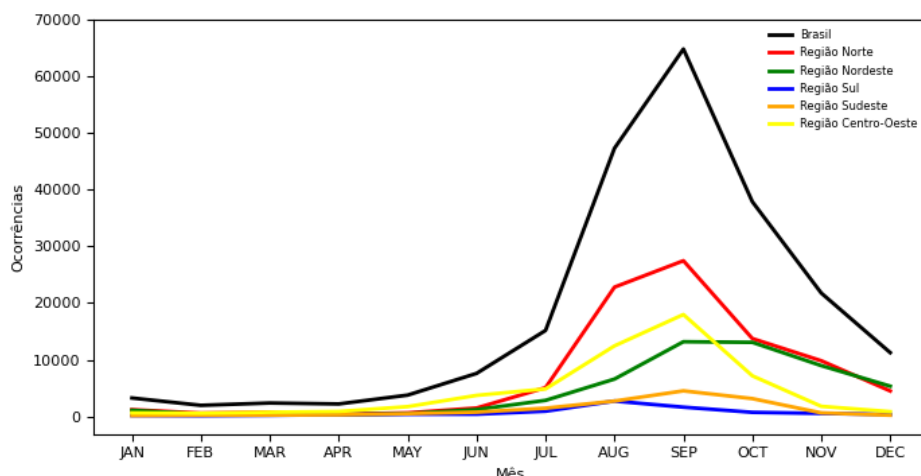


Fonte: Autoria própria, base de dados do AERONET (2023).

Conforme avaliado, as queimadas influenciam diretamente a concentração de partículas suspensas na atmosfera no Brasil. Realizou-se também uma climatologia dos focos de queimadas para validar essa hipótese, Figura 11. Os resultados permitem avaliar que o número de focos de incêndios é maior em setembro e mínimo entre fevereiro e março. A análise por região permite avaliar que as regiões norte e centro-oeste apresentam os maiores números de focos de queimadas. Os meses com maior número de queimadas coincidem com os maiores valores de AOD. Das localidades avaliadas, Abracos-Hill, Rio Brando, Ji-Paraná e Manacapuru foram as regiões que tiveram os maiores valores de AOD, enquanto Petrolina do Norte, Balbina e Belterra foram as regiões com os menores valores.

Figura 11 – Climatologia mensal dos focos de queimadas no território brasileiro de 1998 a 2023 pelo satélite de referência - AQUA Tarde

Climatologia mensal dos focos de queimadas no território brasileiro de 1998 a 2023



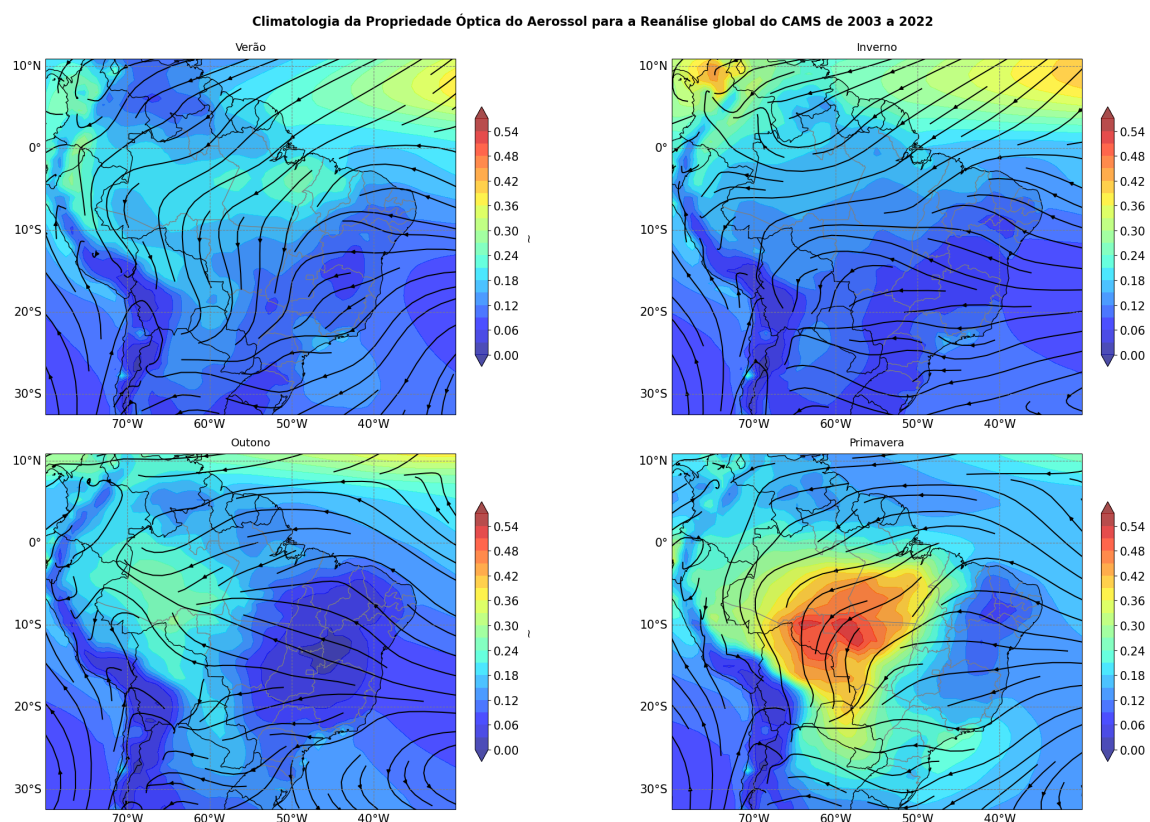
Fonte: Autoria própria, base de dados do BDQueimadas (2023).

5.2 Variabilidade Espacial

Os maiores valores de AOD na primavera estão associados ao baixo volume de precipitação, que reduz as taxas de deposição, e o aumento das emissões por queimadas. Esses fatores contribuem para o aumento do tempo de vida do aerossol na atmosfera, com isso as partículas podem ser transportadas por distâncias maiores e impactar outras regiões. Espera-se, portanto, um transporte de partículas das regiões Centro-Oeste e Norte do Brasil para as regiões Sul e Sudeste. De fato, trabalhos anteriores apontaram o transporte de fumaça para a região Sudeste como consequência de um episódio de nuvens escuras na cidade de São Paulo em agosto de 2019 (LEMES et al., 2020). Nessa época do ano as massas de ar equatorial continental oriundas da bacia amazônica e os corredores de umidade da Amazônia trazem transportam

poluentes para essa região. De fato observamos aqui que os valores elevados de AOD na região Sul e Sudeste do Brasil estão associados a direção dos ventos. O que permite inferir que o AOD recebe uma contribuição do transporte de aerossol de outras regiões, Figura 12.

Figura 12 – Climatologia sazonal da propriedade óptica do aerossol para a reanálise do CAMS de 2003 a 2022.

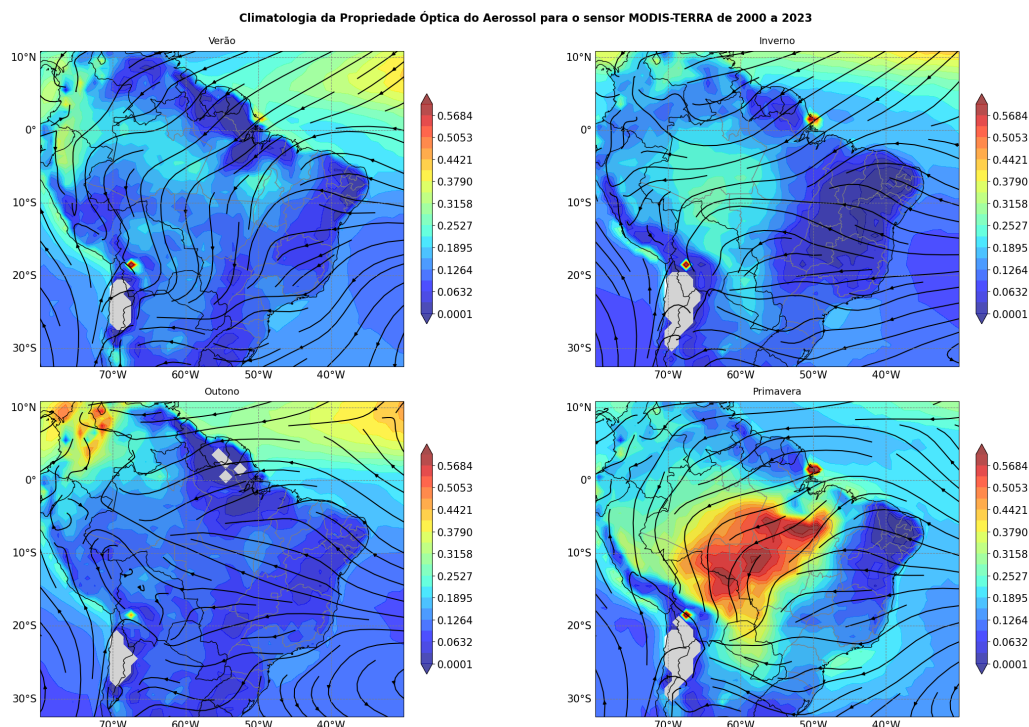


Fonte: Autoria própria, base de dados do CAMS, Inness et al. (2019)

Posteriormente a análise dos municípios foi realizados as medidas sazonais para todo o Brasil, conforme a Figura 12, 13 e 14. Observa-se o padrão de aumento do AOD na primavera em todos os modelos, tendo o TERRA com os maiores valores e o CAMS com os menores valores ficando abaixo na escala. A localização dos máximos é semelhante, mantendo na região onde persevera os máximos de queimadas, denominado arco do desmatamento. Regiões costeiras apresentam os menores valores durante todo o ano tornando um ponto importante de observação.

Os padrões climatológicos espaciais derivados da reanálise do CAMS e dos satélites Modis Aqua, Modis Terra, Figura 12,14, 13, mostram padrões similares porém as magnitudes tendem a variar. De modo geral, toda a região central da América do Sul apresenta valores elevados de AOD durante a primavera.

Figura 13 – Climatologia sazonal da propriedade óptica do aerossol para a sensor MODIS a bordo do satélite TERRA de 2000 a 2023.



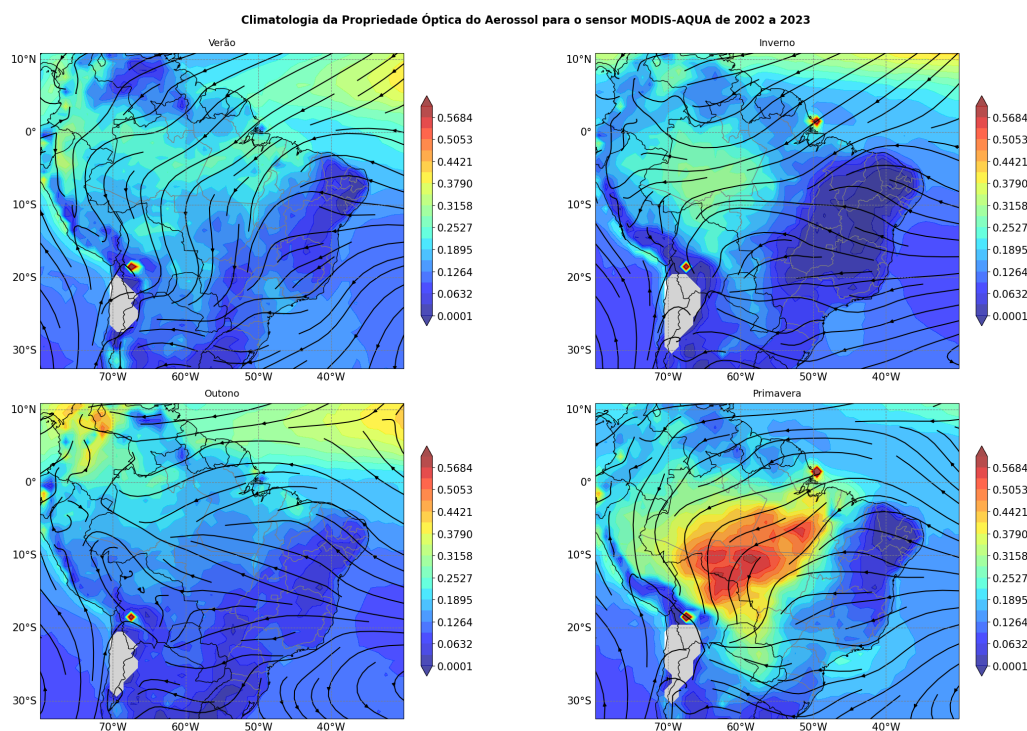
Fonte: Autoria própria, base de dados do MODIS-TERRA Science Team (2014)

O extremo norte do país experimenta os maiores valores de AOD durante o verão, quanto a posição da ZCIT está mais a sul e o transporte de poeira e queimada da África é verificado com maior frequência. A região nordeste experimenta o ano todo baixas concentrações de aerossol e portanto, valores baixos de AOD principalmente no outono. Oliveira (2019) mostraram que os aerossóis identificados na região Nordeste são provenientes da pulverização marítima, queima de biomassa e aerossóis de poeira transportados principalmente da África tropical. A região Sudeste, onde se encontram os maiores centros urbanos do país, experimenta os maiores valores de AOD na primavera com contribuição do transporte da região Central da América do Sul.

Observou-se o padrão de aumento do AOD na primavera em todas as climatologias. A climatologia derivada dos dados do satélite TERRA apresentaram os maiores valores de AOD, enquanto a climatologia derivada dos dados do CAMS apresentou os menores valores. A localização dos máximos é semelhante, e compreende a região onde é esperado o maior número de queimadas. As Regiões costeiras apresentam os menores valores de AOD durante todo o ano. Os Alísios de sudeste e nordeste atuam de modo a manter relativamente baixas as concentrações de aerossol próximo à superfície, uma vez que mantém um certo padrão fixo de entrada de massas de ar oceânicas caracterizadas por baixas concentrações de aerossol, exceto pela contribuição de aerossóis marinhos. Na porção Sul do país a frequência de ocorrência de

sistemas frontais contribui para a remoção das partículas na atmosfera a baixa carga de aerossol.

Figura 14 – Climatologia sazonal da propriedade óptica do aerossol para a sensor MODIS a bordo do satélite AQUA de 2002 a 2023.



Fonte: Autoria própria, base de dados do MODIS-AQUA Science Team (2014)

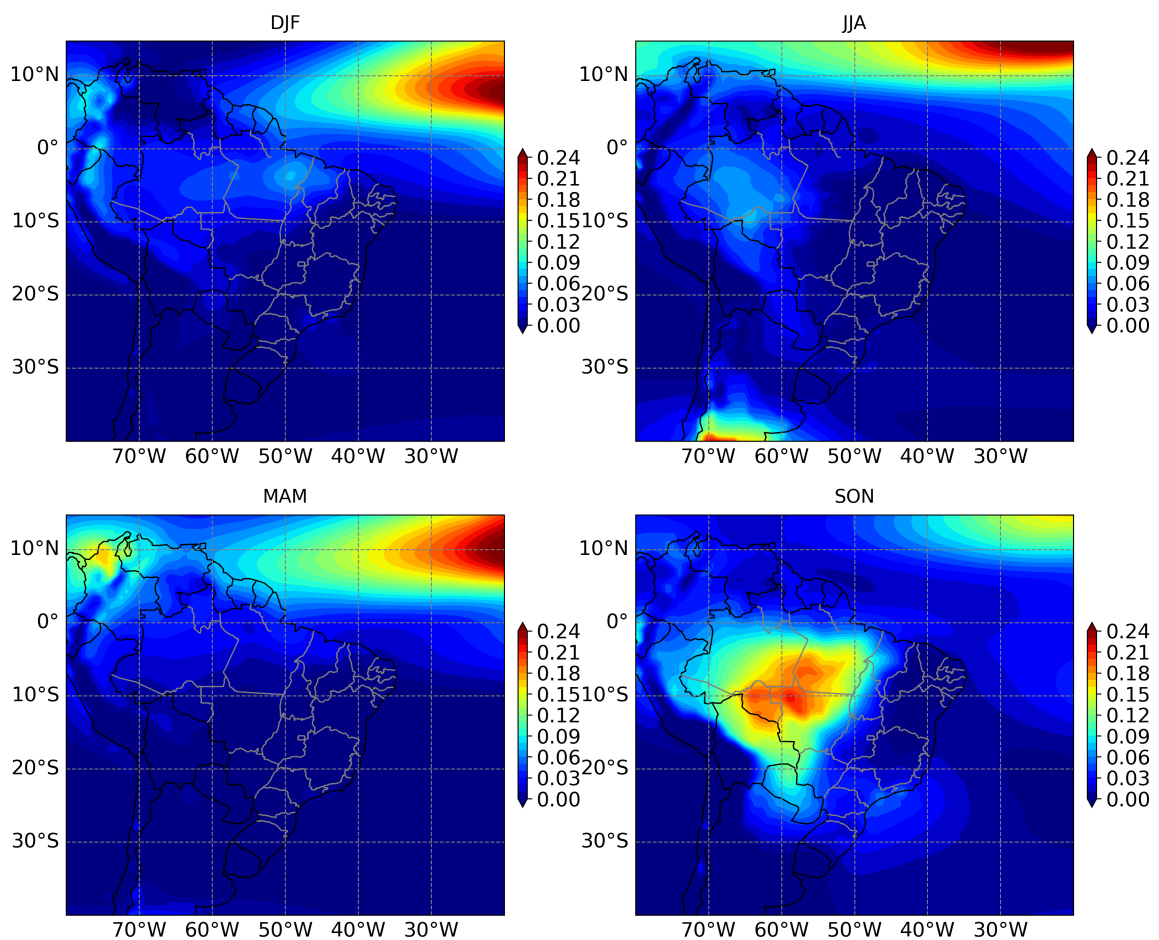
O satélite modis TERRA apresenta os menores valores de AOD para o extremo norte da região Norte, porém durante a primavera os valores climatológicos do AOD são maiores se comparados às outras fontes de dados. Os valores do AOD climatológicos são similares para os dados derivados de Satélite para a região Nordeste e tendem a ser menores para os dados derivados do CAMS. Na região Sudeste os valores de AOD climatológico derivados do CAMS são relativamente maiores se comparados aos derivados dos dados de satélite. Isso sugere que existem diferenças nas estimativas que devem ser consideradas e avaliadas a fim de minimizar os impactos na avaliação do feedback dos aerossóis no sistema climático. Os picos observados na climatologia derivadas dos satélites AQUA e TERRA nas quatro estações do ano no Chile parecem estar relacionados à atividade vulcânica. Os picos observados próximo a cidade de Belém-PA no inverno e na primavera não puderam ser explicados.

5.3 Efeito do AOD no Potencial Solar

Buscando entender a relação do aerossol com a produção de energia solar no Brasil foi realizado cálculo do POAI com e sem o efeito dos aerossóis, Figura 15 . Os

resultados mostram que o efeito direto dos aerossóis é importante no aproveitamento solar. As queimadas contribuem para uma perda de 25% durante a primavera. Na região Nordeste, onde o potencial solar é bastante conhecido e promissor, destaca-se o efeito do transporte de poeira e fumaça da África. As máximas perdas coincidem com a posição climatológica das ZCIT e os alísios responsáveis por estes transportes. Na região Nordeste as principais perdas são observadas durante o verão (5% - nos estados da porção norte. No interior da região as perdas são mínimas. Na região Sudeste e Sul as maiores perdas, cerca de 8% são observadas na primavera. Boa parte da Amazônia apresenta perdas, entretanto em se tratando de potencial solar deve-se considerar também a expressiva cobertura de nuvens que contribui ainda mais para a redução do POAI.

Figura 15 – Eficiência do efeito do aerossol sazonal (AEE, $kWh/m^2/d/\tau$).



Fonte: Autoria própria, base de dados do (INNESS et al., 2019).

6 CONCLUSÃO

A climatologia da propriedade óptica do aerossol possui um padrão uniforme e similar entre as diferentes bases de dados, evidenciando uma boa representação da reanálise do CAMS e do sensor MODIS no satélite AQUA e TERRA quando comparados com o dado observado do AERONET, porém os dados observados derivados da AEROENET são maiores quando analisa pontualmente.

As imagens reproduzidas traduzem um padrão de aumento na primavera de corrente de ser um mês seco tornando-se propenso a incêndios (principal fonte de poluição antropogênica no Brasil), sendo representado na Figura 14 da climatologia mensal dos focos de queimadas no Brasil, que mostra um aumento exorbitante nos meses de agosto, setembro e outubro com ênfase em setembro com um pico.

Investigando os mapas sazonais para o Brasil é possível identificar o aumento em setembro como relatado acima, porém se destaca o aumento do AOD na região norte e uma parte da região Centro-Oeste, áreas estas que estão sob o domínio do arco de desmatamento, onde as massas de ar equatorial continental realizam o transporte dos poluentes para outras regiões, portanto é importante estudar essa região implantando mais estações de monitoramento da qualidade do ar.

Um dos principais questionamentos do trabalho era como o aerossol interferia na produção de energia solar. Analisando as imagens produzidas no trabalho foi possível identificar uma proporcionalidade entre o AOD e o POAI, enquanto o aerossol aumenta na primavera a energia solar sofre uma redução de até 25% na sua produção. A região mais afetada é a norte com um pico extremo, porém as regiões ao entorno reduzem de maneira moderada, esse resultado é de extrema relevância, pois sabendo desse padrão pode-se estudar e analisar qual local não é viável para instalações de painéis solares.

Portanto, conclui-se a veracidade dos dados de AOD para o Brasil, determina que os impactos das queimadas são um dos maiores impulsionadores de material particulado na atmosfera e a localização dos maiores valores de AOD coincide com a região do arco do desmatamento, além da inversão proporcional entre o aerossol e a energia solar.

7 REFERÊNCIAS

- AERONET. **Interface de Exibição de Dados de Profundidade Óptica do Aerossol - AERONET**. 2023. Disponível em: <https://aeronet.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/climo_menu_new_v3>. Acesso em: 16 de outubro de 2023.
- ALBRECHT, B. A. Aerosols, cloud microphysics, and fractional cloudiness. **Science**, American Association for the Advancement of Science, v. 245, n. 4923, p. 1227–1230, 1989.
- ALVES, C. Aerossóis atmosféricos: perspectiva histórica, fontes, processos químicos de formação e composição orgânica. **Química nova**, SciELO Brasil, v. 28, p. 859–870, 2005.
- ANDREAE, M.; ROSENFELD, D. Aerosol–cloud–precipitation interactions. part 1. the nature and sources of cloud-active aerosols. **Earth-Science Reviews**, Elsevier, v. 89, n. 1-2, p. 13–41, 2008.
- ARAGÃO, L. et al. Frequência de queimadas durante as secas recentes. **Secas na Amazônia: causas e consequências** (ed. Borma LDS, Nobre CA). **Oficina de Textos**, 2013.
- ARTAXO, P. et al. Physical and chemical properties of aerosols in the wet and dry seasons in rondônia, amazonia. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, Wiley Online Library, v. 107, n. D20, p. LBA–49, 2002.
- ARTAXO, P. et al. Efeitos climáticos de partículas de aerossóis biogênicos e emitidos em queimadas na amazônia. **Revista brasileira de meteorologia**, v. 21, n. 3a, p. 168–22, 2006.
- BDQUEIMADAS. **Monitoramento dos Focos Ativos por Região**. 2023. Disponível em: <http://terrabrasilis.dpi.inpe.br/queimadas/situacao-atual/estatisticas/estatisticas_estados/>. Acesso em: 16 de outubro de 2023.
- CARBONI, E. et al. Intercomparison of desert dust optical depth from satellite measurements. **Atmospheric Measurement Techniques**, Copernicus GmbH, v. 5, n. 8, p. 1973–2002, 2012.
- CATAÑO, M. G. Q. Variabilidade espaço-temporal dos focos de queimadas sobre a região central da américa do sul. **Clima e Ambiente-CLIAMB**, 2021.
- CAVALCANTI, I. F. **Tempo e clima no Brasil**. [S.l.]: Oficina de textos, 2016.
- CORREIA, A. et al. Produto de aerossóis. **O sensor MODIS e suas aplicacoes ambientais no Brasil**, Oficina de Textos São Paulo, v. 1, p. 297–314, 2013.
- COUTINHO, L. M.; MIRANDA, H. S.; MORAIS, H. C. d. O bioma do cerrado e o fogo: l-caracterização. **Estudos avançados. Coleção documentos. Ciências ambientais**, n. 20, p. 1–46, 2002.
- FERNANDES, E. P. Estudo das propriedades químicas e físicas dos aerossóis submicrométricos na amazônia central. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia-INPA, 2018.

FIELD, C. B. et al. **Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation: special report of the intergovernmental panel on climate change**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2012.

FREITAS, S. R. et al. Emissões de queimadas em ecossistemas da América do Sul. **Estudos avançados**, SciELO Brasil, v. 19, p. 167–185, 2005.

FUZZI, S. et al. Critical assessment of the current state of scientific knowledge, terminology, and research needs concerning the role of organic aerosols in the atmosphere, climate, and global change. **Atmospheric Chemistry and Physics**, Copernicus GmbH, v. 6, n. 7, p. 2017–2038, 2006.

GONÇALVES, D. d. S. et al. Estudos teóricos de moléculas orgânicas na formação de aerossóis atmosféricos. Universidade Federal do Amazonas, 2021.

GUENTHER, A. et al. A global model of natural volatile organic compound emissions. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, Wiley Online Library, v. 100, n. D5, p. 8873–8892, 1995.

HOLBEN, B. N. et al. Aeronet—a federated instrument network and data archive for aerosol characterization. **Remote sensing of environment**, Elsevier, v. 66, n. 1, p. 1–16, 1998.

HOLMES, N. A review of particle formation events and growth in the atmosphere in the various environments and discussion of mechanistic implications. **Atmospheric Environment**, Elsevier, v. 41, n. 10, p. 2183–2201, 2007.

HOLMGREN, W. F.; HANSEN, C. W.; MIKOFSKI, M. A. pvlib python: A python package for modeling solar energy systems. **Journal of Open Source Software**, v. 3, n. 29, p. 884, 2018.

HORVATH, H. Aerosols—an introduction. **Journal of environmental radioactivity**, v. 51, n. 1, p. 5–25, 2000.

HOYER, S.; HAMMAN, J. xarray: N-D labeled arrays and datasets in Python. **Journal of Open Research Software**, Ubiquity Press, v. 5, n. 1, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.5334/jors.148>>.

HUNTER, J. D. Matplotlib: A 2d graphics environment. **Computing in Science & Engineering**, IEEE COMPUTER SOC, v. 9, n. 3, p. 90–95, 2007.

IBGE. **Paranorama: Brasil**. 2023. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/paranorama>>. Acesso em: 16 de maio de 2023.

INNESS, A. et al. The CAMS reanalysis of atmospheric composition. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 19, n. 6, p. 3515–3556, 2019. Disponível em: <<https://acp.copernicus.org/articles/19/3515/2019/>>.

IPCC. Index. In: _____. **Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007. p. In press.

KAUFMAN, Y. J.; NAKAJIMA, T. Effect of amazon smoke on cloud microphysics and albedo-analysis from satellite imagery. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 32, n. 4, p. 729–744, 1993.

KINNE, S. et al. An aerocom initial assessment—optical properties in aerosol component modules of global models. **Atmospheric Chemistry and Physics**, Copernicus GmbH, v. 6, n. 7, p. 1815–1834, 2006.

KOREN, I. et al. Measurement of the effect of amazon smoke on inhibition of cloud formation. **Science**, American Association for the Advancement of Science, v. 303, n. 5662, p. 1342–1345, 2004.

LANDAU, C. R. **Optimum Tilt of Solar Panels**. 2017. Disponível em: <<https://www.solarpaneltilt.com/>>. Acesso em: 16 de outubro de 2023.

LEMES, M.; REBOITA, M. S.; CAPUCIN, B. C. Impactos das queimadas na amazônia no tempo em são paulo na tarde do dia 19 de agosto de 2019. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 3, p. 983–993, 2020.

MARTIN, S. T. et al. Sources and properties of amazonian aerosol particles. **Reviews of Geophysics**, Wiley Online Library, v. 48, n. 2, 2010.

MARTIN, S. T. et al. Introduction: Observations and modeling of the green ocean amazon (goamazon2014/5). **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 16, n. 8, p. 4785–4797, 2016. Disponível em: <<https://acp.copernicus.org/articles/16/4785/2016/>>.

MARTINS, G. et al. **APLICAÇÕES DE PYTHON EM GEOCIÊNCIAS INPE**. [S.l.: s.n.], 2022.

MARTINS, J. V. et al. Effects of black carbon content, particle size, and mixing on light absorption by aerosols from biomass burning in brazil. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, Wiley Online Library, v. 103, n. D24, p. 32041–32050, 1998.

MCKINNEY Wes. Data Structures for Statistical Computing in Python. In: WALT Stéfan van der; MILLMAN Jarrod (Ed.). **Proceedings of the 9th Python in Science Conference**. [S.l.: s.n.], 2010. p. 56 – 61.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil**. [S.l.]: Oficina de textos, 2017.

MENEZES, J. A. et al. Climatologia da profundidade ótica e dependência espectral de aerossóis em regiões de floresta e cerrado no brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 23, 2018.

Met Office. **Cartopy: a cartographic python library with a Matplotlib interface**. Exeter, Devon, 2010 – 2015. Disponível em: <<https://scitools.org.uk/cartopy>>.

MODIS-AQUA Science Team. **MYD08_M3 MODIS/Aqua Aerosol Cloud Water Vapor Ozone Monthly L3 Global 1Deg CMG**. NASA Level 1 and Atmosphere Archive and Distribution System Distributed Active Archive Center, 2014. Disponível em: <http://modaps.modaps.eosdis.nasa.gov/services/about/products/c6/MYD08_M3.html>.

MODIS-TERRA Science Team. **MOD08_M3 MODIS/ Terra Aerosol Cloud Water Vapor Ozone Monthly L3 Global 1Deg CMG**. NASA Level 1 and Atmosphere Archive and Distribution System Distributed Active Archive Center, 2014. Disponível em: <http://modaps.modaps.eosdis.nasa.gov/services/about/products/c6/MOD08_M3.html>.

NASCIMENTO, J. P. et al. Aerosols from anthropogenic and biogenic sources and their interactions – modeling aerosol formation, optical properties, and impacts over the central amazon basin. **Atmospheric Chemistry and Physics**, Copernicus GmbH, v. 21, n. 9, p. 6755–6779, maio 2021. ISSN 1680-7324.

OLIVEIRA, A. M. d. Caracterização de profundidade óptica de aerossóis atmosféricos no nordeste brasileiro: um estudo através do sistema de modelagem eurasim com assimilação de dados. Brasil, 2019.

OLMEDA, C. T. et al. Climatología de los aerosoles mediante la caracterización de propiedades ópticas y masas de aire en la estación ‘el arenosillo’ de la red aerone. 2005.

PAIXÃO, M. A. et al. Climatologia das propriedades ópticas do aerossol na amazônia com base na rede aeronet. In: **Anais do XV Congresso Brasileiro de Meteorologia**. [S.l.: s.n.], 2008.

PAIXÃO, M. M. d. A. **Propriedades ópticas de aerossóis naturais e de queimadas da Amazônia**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2011.

PALÁCIOS, R. da S. et al. Variabilidade da profundidade ótica de aerossóis atmosféricos sobre o pantanal brasileiro (depth optical variability of atmospheric aerosols on the brazilian pantanal). **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 18, 2016.

PEREIRA, E. B. et al. **Atlas brasileiro de energia solar**. [S.l.]: Inpe São José dos Campos, 2006. v. 1.

PINCUS, R.; BAKER, M. B. Effect of precipitation on the albedo susceptibility of clouds in the marine boundary layer. **Nature**, Nature Publishing Group UK London, v. 372, n. 6503, p. 250–252, 1994.

PyHDF - Science Team. **PyHDF - a Python wrapper around the NCSA HDF version 4 library**. 2023. Disponível em: <<http://fhs.github.io/pyhdf/>>.

RAES, F. et al. Formation and cycling of aerosols in the global troposphere. **Atmospheric environment**, Elsevier, v. 34, n. 25, p. 4215–4240, 2000.

RAFEE, S. A. A. et al. Contributions of mobile, stationary and biogenic sources to air pollution in the amazon rainforest: a numerical study with the wrf-chem model. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 17, n. 12, p. 7977–7995, 2017. Disponível em: <<https://acp.copernicus.org/articles/17/7977/2017/>>.

RAMANATHAN, V. et al. Indian ocean experiment: An integrated analysis of the climate forcing and effects of the great indo-asian haze. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, Wiley Online Library, v. 106, n. D22, p. 28371–28398, 2001.

REGMI, J. et al. Investigation of aerosol climatology and long-range transport of aerosols over pokhara, nepal. **Atmosphere**, MDPI, v. 11, n. 8, p. 874, 2020.

REMER, L. A. et al. Global aerosol climatology from the modis satellite sensors. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, Wiley Online Library, v. 113, n. D14, 2008.

RENOUX, A.; BOULARD, D. **Les aérosols. Physique et Métrologie**. [S.l.]: Lavoisier Technique Documentation: Paris, 1998.

REZENDE, J. O. A importância da energia solar para o desenvolvimento sustentável. **São Paulo: Atena**, 2019.

ROSÁRIO, N. M. É. d.; YAMASOE, M. A.; LONGO, K. M. Estudo da variabilidade das propriedades ópticas dos aerossóis sobre a américa do sul e dos impactos do efeito radiativo direto das partículas de queimadas. 2011.

ROSENFELD, D. Trmm observed first direct evidence of smoke from forest fires inhibiting rainfall. **Geophysical research letters**, Wiley Online Library, v. 26, n. 20, p. 3105–3108, 1999.

RUIZ-ARIAS, J. A. et al. Assessing the surface solar radiation budget in the wrf model: A spatiotemporal analysis of the bias and its causes. **Monthly Weather Review**, American Meteorological Society, v. 144, n. 2, p. 703–711, 2016.

SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N. From air pollution to climate change. **Atmospheric chemistry and physics**, John Wiley & Sons New York, v. 1326, 1998.

SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N. Atmospheric chemistry and physics, a wiley-inter science publication. In: **John Wiley & Sons Inc.** [S.l.: s.n.], 2006.

SILVEIRA, M. V. et al. Drivers of fire anomalies in the brazilian amazon: Lessons learned from the 2019 fire crisis. **Land**, MDPI, v. 9, n. 12, p. 516, 2020.

SONG, Q. et al. Global dust optical depth climatology derived from caliop and modis aerosol retrievals on decadal timescales: regional and interannual variability. **Atmospheric Chemistry and Physics**, Copernicus GmbH, v. 21, n. 17, p. 13369–13395, 2021.

SOUZA, A. de et al. Study of aerosol optical depth climatology using modis remote sensing data. **European Chemical Bulletin**, v. 9, n. 9, p. 291–299, 2020.

TARGINO, A. C. et al. Surface ozone climatology of south eastern brazil and the impact of biomass burning events. **Journal of Environmental Management**, v. 252, p. 109645, 2019. ISSN 0301-4797. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479719313635>>.

TEXTOR, C. et al. Analysis and quantification of the diversities of aerosol life cycles within aerocom. **Atmospheric Chemistry and Physics**, Copernicus GmbH, v. 6, n. 7, p. 1777–1813, 2006.

TWOMEY, S. The influence of pollution on the shortwave albedo of clouds. **Journal of the atmospheric sciences**, American Meteorological Society, v. 34, n. 7, p. 1149–1152, 1977.

VOSS, K. K.; EVAN, A. T. A new satellite-based global climatology of dust aerosol optical depth. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 59, n. 1, p. 83–102, 2020.

WALLACE, J. M.; HOBBS, P. V. **Atmospheric science: an introductory survey**. [S.l.]: Elsevier, 2006. v. 92.

WANG, S.-H. et al. Determination of lidar ratio for major aerosol types over western north pacific based on long-term mplnet data. **Remote Sensing**, MDPI AG, v. 12, n. 17, p. 2769, ago. 2020. ISSN 2072-4292.

WESELY, M.; HICKS, B. A review of the current status of knowledge on dry deposition. **Atmospheric environment**, Elsevier, v. 34, n. 12-14, p. 2261–2282, 2000.

WHITBY, L. et al. Ecological consequence of acidic and heavy-metal discharges from the sudbury smelters. **Can. Mineral.:(Canada)**, v. 14, 1976.

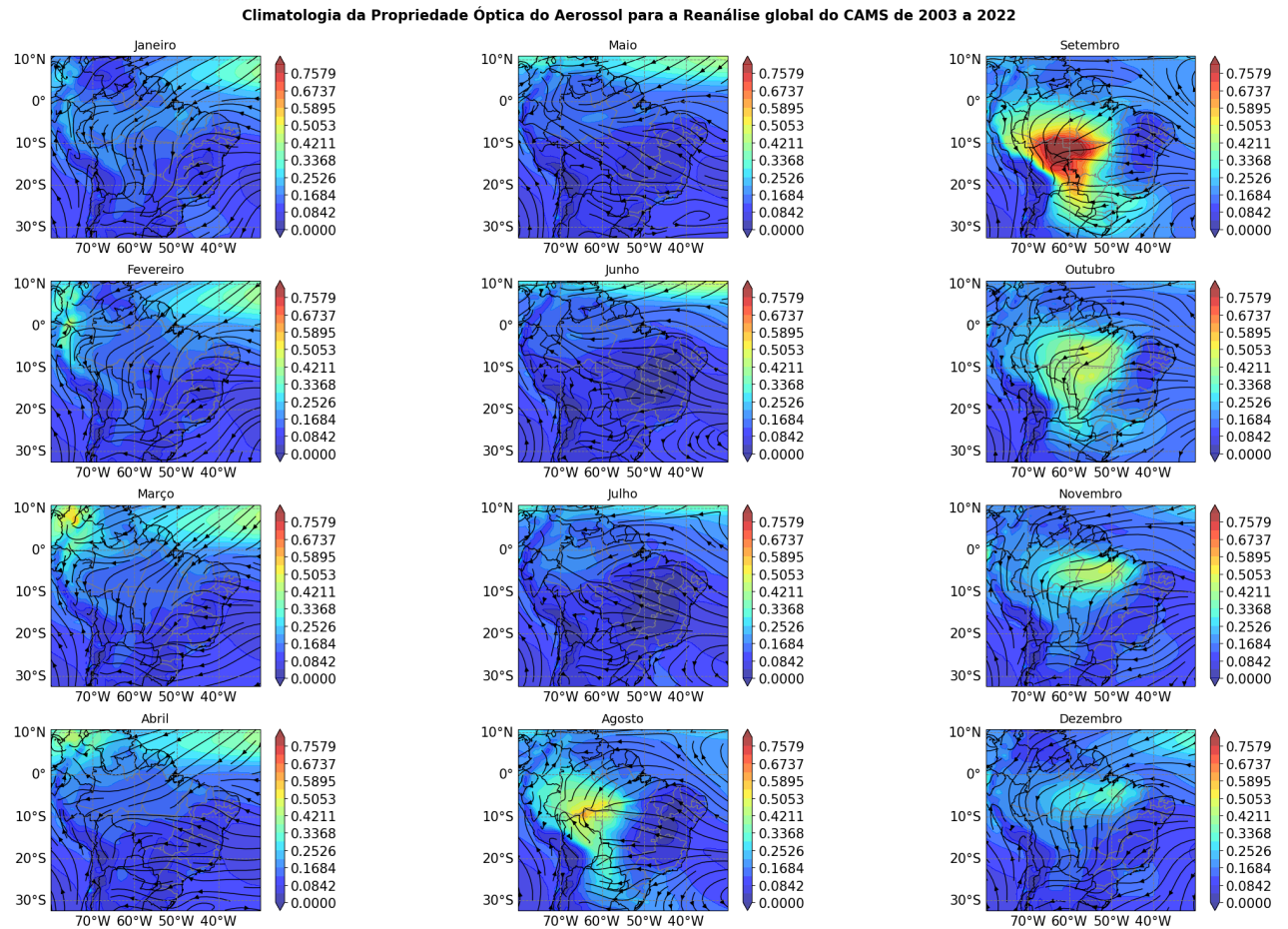
XIAN, P. et al. Arctic spring and summertime aerosol optical depth baseline from long-term observations and model reanalyses—part 1: Climatology and trend. **Atmospheric Chemistry and Physics**, Copernicus GmbH, v. 22, n. 15, p. 9915–9947, 2022.

YAMASOE, M. et al. Retrieval of the real part of the refractive index of smoke particles from sun/sky measurements during scar-b. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, Wiley Online Library, v. 103, n. D24, p. 31893–31902, 1998.

YANG, J. et al. Diverse cloud and aerosol impacts on solar photovoltaic potential in southern china and northern india. **Scientific Reports**, Nature Publishing Group UK London, v. 12, n. 1, p. 19671, 2022.

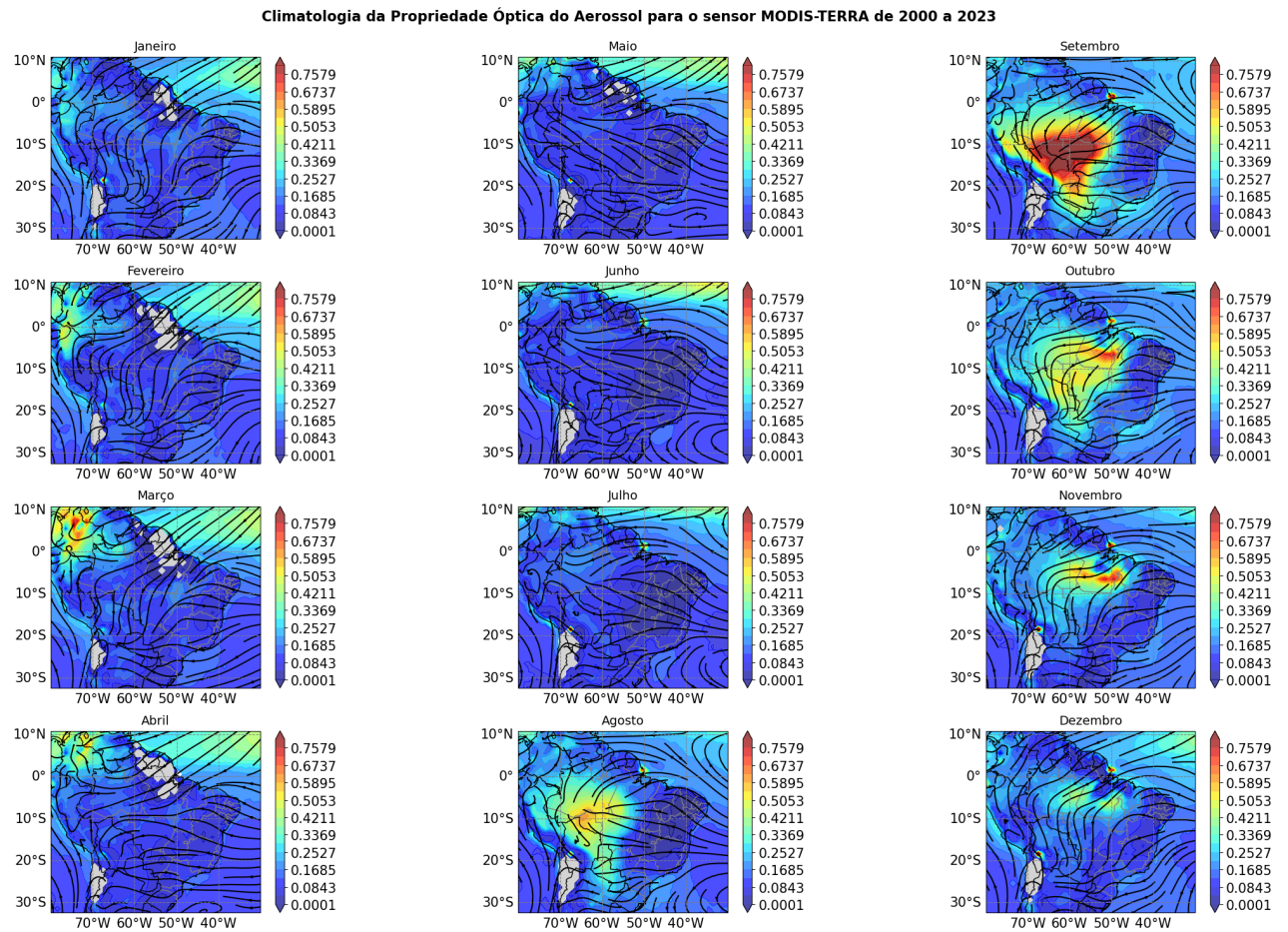
APÊNDICE A – CLIMATOLOGIA DO AEROSSOL MENSAL

Figura 16 – Climatologia mensal da propriedade óptica do aerossol para a reanálise do CAMS de 2003 a 2022.



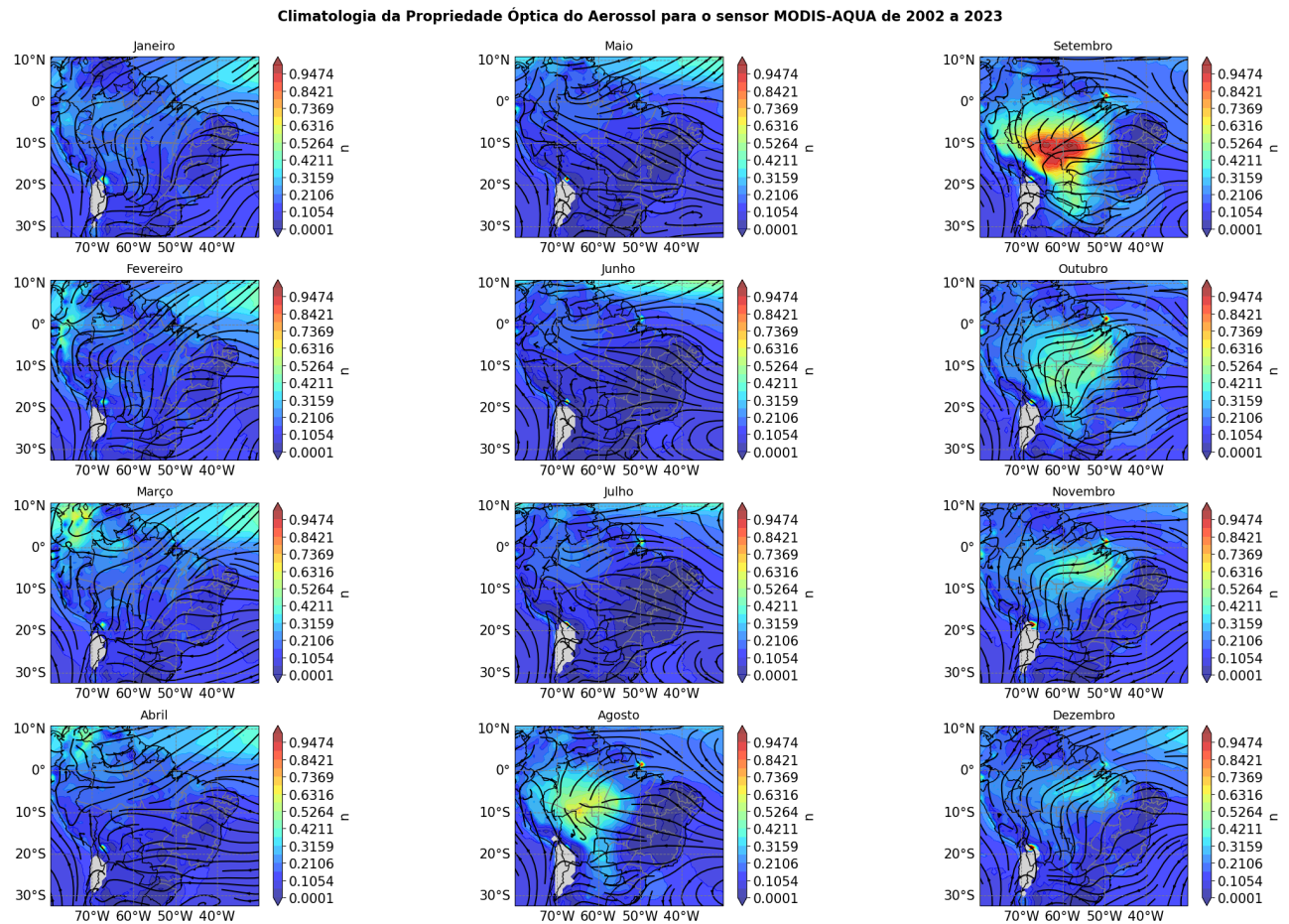
Fonte: Autoria própria, base de dados do CAMS, Inness et al. (2019)

Figura 17 – Climatologia mensal da propriedade óptica do aerossol para a sensor MODIS a bordo do satélite TERRA de 2000 a 2023.



Fonte: Autoria própria, base de dados do MODIS-TERRA Science Team (2014)

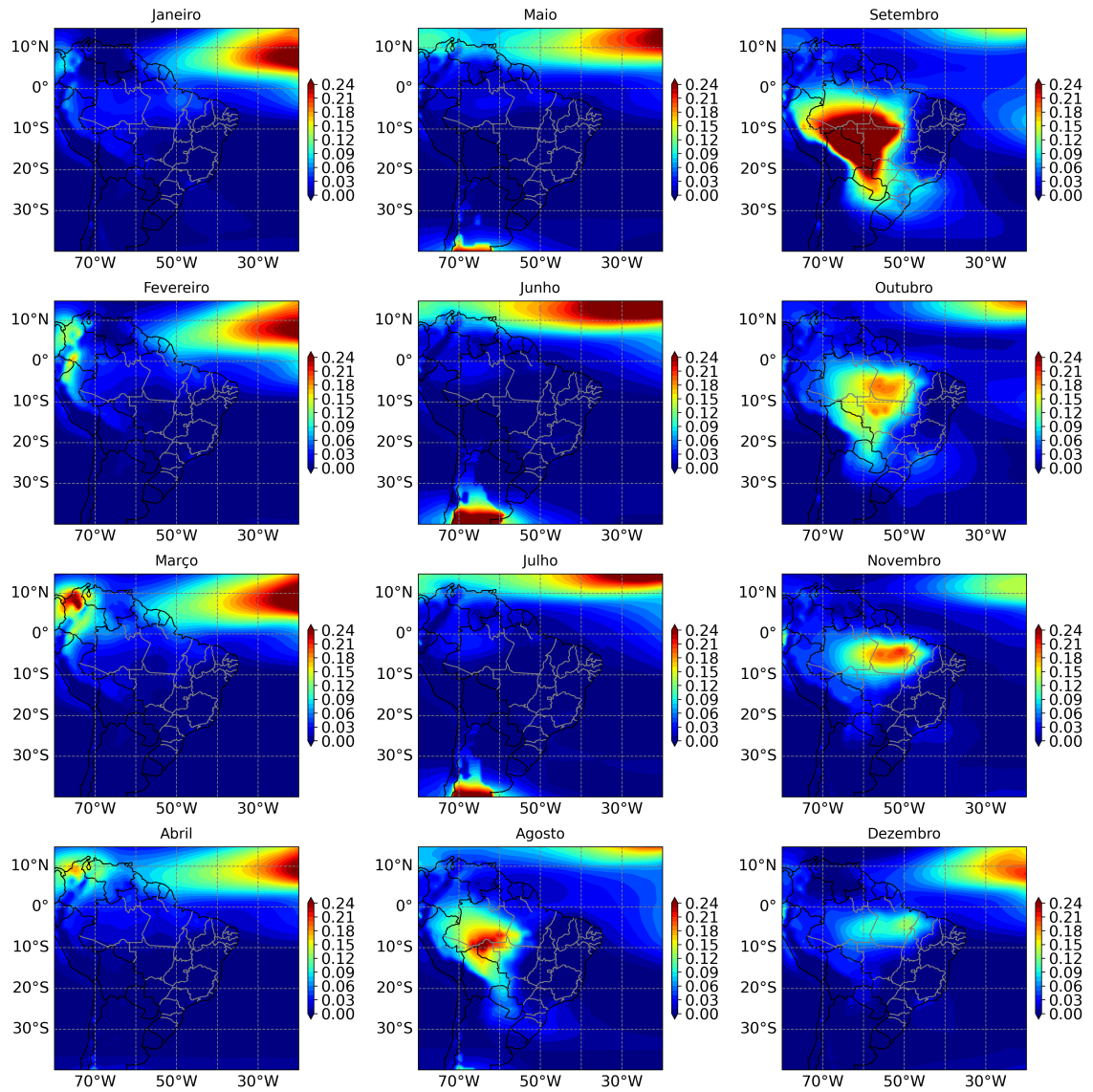
Figura 18 – Climatologia mensal da propriedade óptica do aerossol para a sensor MODIS a bordo do satélite AQUA de 2002 a 2023.



Fonte: Autoria própria, base de dados do MODIS-AQUA Science Team (2014)

APÊNDICE B – EFICIÊNCIA DO EFEITO DO AEROSSOL MENSAL

Figura 19 – Eficiência do efeito do aerossol mensal (AEE, $kWh/m^2/d/\tau$).



Fonte: Autoria própria, base de dados do Inness et al. (2019)