



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL

Bruno neves de Campos

**Avaliação do impacto dos aerossóis atmosféricos na geração de energia de sistemas
fotovoltaicos**

CUIABÁ - MT

2026

Bruno Neves de Campos

**Avaliação do impacto dos aerossóis atmosféricos na geração de energia de sistemas
fotovoltaicos**

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Física Ambiental da Universidade Federal de Mato Grosso como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em Física Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Rafael da Silva Palácios

CUIABÁ-MT

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

C198a Campos, Bruno Neves de.

Avaliação do impacto dos aerossóis atmosféricos na geração de energia de sistemas fotovoltaicos [recurso eletrônico] / Bruno Neves de Campos. -- Dados eletrônicos (1 arquivo : 85 f., il. color., pdf). -- 2026.

Orientador: Rafael da Silva Palácios.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Física, Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Cuiabá, 2026.

Modo de acesso: World Wide Web: <https://ri.ufmt.br>.

Inclui bibliografia.

1. forçamento radiativo. 2. kruskal-wallis. 3. irradiância relativa. I. Palácios, Rafael da Silva, *orientador*. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
PRÓ-REITORIA DE ENSINO DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL

FOLHA DE APROVAÇÃO

TÍTULO: AVALIAÇÃO DO IMPACTO DOS AEROSSÓIS ATMOSFÉRICOS NA GERAÇÃO DE ENERGIA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

AUTOR: MESTRANDO BRUNO NEVES DE CAMPOS

Dissertação defendida e aprovada em **20** de **março** de **2026**.

COMPOSIÇÃO DA BANCA EXAMINADORA

1. PROF. DR. RAFAEL DA SILVA PALÁCIOS [Presidente Banca / **Orientador**]

INSTITUIÇÃO: UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

2. PROF. DR. LEONE FRANCISCO AMORIM CURADO [Examinador Interno]

INSTITUIÇÃO: UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO

3. PROF. DR. FERNANDO GONÇALVES MORAIS [Examinador Externo]

INSTITUIÇÃO: BROOKHAVEN NATIONAL LABORATORY, NEW YORK, NY, USA

4. PROF. DR. THIAGO RANGEL RODRIGUES [Examinador Externo]

INSTITUIÇÃO: UNIVERSIDADE FEDERAL DO MATO GROSSO DO SUL

CUIABÁ, 20/03/2026.



Documento assinado eletronicamente por **MARCELO SACARDI BIUDES**, **Coordenador(a) de Programas de Pós-Graduação em Física Ambiental - IF/UFMT**, em 20/03/2026, às 17:08, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **LEONE FRANCISCO AMORIM CURADO**, **Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 20/03/2026, às 17:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fernando Gonçalves Moraes**, **Usuário Externo**, em 22/03/2026, às 19:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Thiago Rangel Rodrigues**, **Usuário Externo**, em 23/03/2026, às 01:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rafael da Silva Palácios**, **Usuário Externo**, em 23/03/2026, às 10:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufmt.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **9033739** e o código CRC **719D35AA**.

Dedico este trabalho a Deus que me deu forças
para realizá-lo, a minha esposa que esteve ao
meu lado a cada dificuldade e aos meus filhos
que são o impulso que me leva a ir mais além.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a influência de aerossóis atmosféricos na geração de energia de um sistema fotovoltaico instalado em uma usina de solo na região sudoeste do estado de Mato Grosso. A usina analisada está localizada no município de Pontes e Lacerda e opera sob condições climáticas típicas de savana tropical (Aw), caracterizadas por uma estação seca prolongada, frequentemente associada à ocorrência de queimadas regionais e à consequente degradação da qualidade do ar. Foram utilizados dados reais de geração energética obtidos a partir da plataforma de monitoramento do inversor do sistema fotovoltaico, integrados a variáveis meteorológicas provenientes de quatro estações do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), bem como estimativas de profundidade óptica de aerossóis (AOD) oriundas do sensor MODIS e de medições em superfície da rede AERONET, empregadas como referência de validação, cujo banco de dados remonta ao período entre julho de 2018 e dezembro de 2023. A radiação solar global foi estimada por meio do modelo empírico de Bristow–Campbell, calibrado com coeficientes regionais, enquanto o impacto dos aerossóis sobre a potência gerada foi avaliado com base nas metodologias de Forçante Radiativa de Aerossóis na Potência (PARF) e Irradiância Relativa. Os resultados indicam associação estatisticamente significativa entre o aumento da AOD e a redução da geração energética do sistema fotovoltaico, mostrando que elevações da AOD a partir de 0,1 podem levar a uma redução média de entorno de 35%, evidenciando o papel dos aerossóis como moduladores relevantes da irradiância disponível à superfície. Tais achados reforçam a necessidade de incorporação explícita de variáveis atmosféricas em modelos de previsão e planejamento energético, especialmente em regiões sujeitas a eventos recorrentes de emissão de material particulado.

Palavras-chave: forçamento radiativo; kruskal-wallis; irradiância relativa.

ABSTRACT

This study aims to evaluate the influence of atmospheric aerosols on the energy generation of a photovoltaic system installed in a ground-mounted power plant in the southwestern region of the state of Mato Grosso. The plant analyzed is located in the municipality of Pontes e Lacerda and operates under typical tropical savanna (Aw) climatic conditions, characterized by a prolonged dry season, frequently associated with the occurrence of regional wildfires and consequent degradation of air quality. Real energy generation data obtained from the photovoltaic system's inverter monitoring platform were used, integrated with meteorological variables from four stations of the National Institute of Meteorology (INMET), as well as aerosol optical depth (AOD) estimates from the MODIS sensor and surface measurements from the AERONET network, employed as a validation reference, whose database covers the period between July 2018 and December 2023. Global solar radiation was estimated using the Bristow-Campbell empirical model, calibrated with regional coefficients, while the impact of aerosols on generated power was evaluated based on the Aerosol Radiative Forcing on Power (PARF) and Relative Irradiance methodologies. The results indicate a statistically significant association between increased AOD and reduced energy generation from the photovoltaic system, showing that an increase in AOD starting from 0,1 can lead to an average reduction of 39 kWh, highlighting the role of aerosols as relevant modulators of available surface irradiance. These findings reinforce the need for the explicit incorporation of atmospheric variables in energy forecasting and planning models, especially in regions subject to recurring particulate matter emission events.

Keywords: Radiative forcing; Kruskal-Wallis; relative irradiance..

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 OBJETIVOS	12
2.1 Objetivo Geral	12
2.2 Objetivos específicos	12
2.3 Relação com os objetivos de desenvolvimento sustentáveis	12
3 REVISÃO DE LITERATURA	14
3.1 Fundamentação teórica	14
3.1.1 Radiação Solar	14
3.1.2 Aerossóis Atmosféricos	15
3.1.3 Interação entre Aerossóis e a Radiação Solar	16
3.1.4 Coeficiente de Extinção da Radiação e Profundidade Óptica de Aerossóis	17
3.1.5 Irradiância Relativa	20
3.1.6 Forçante Radiativa de Aerossóis	22
3.1.7 Geração de Energia Solar Fotovoltaica	25
4 MATERIAIS E MÉTODOS	27
4.1 Local de realização do trabalho	27
4.2 Medidas micrometeorológicas	28
4.3 Aquisição de dados	30
4.3.1 Dados de satélite	30
4.3.2 Dados de estação no solo	32
4.3.3 Estimativa da radiação solar de onda curta	34
4.3.4 Dados de energia gerada	35
4.4 Metodologia de análise	36
4.4.1 Preparação dos dados	36
4.4.2 Avaliação dos Efeitos dos aerossóis	41
4.4.3 Análise estatística	42
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
5.1 Avaliação do produto MAIAC MODIS	45
5.2 Avaliação das emissões de queimadas na energia gerada	48
REFERÊNCIAS	60
Anexo 1 – Tabelas	65
Anexo 2 – Artigo de revisão de literatura	68

1 INTRODUÇÃO

A crescente expansão da matriz energética baseada em fontes renováveis tem impulsionado o desenvolvimento e a difusão de sistemas de geração de energia fotovoltaica em diferentes regiões do mundo. Entre as diversas alternativas energéticas de baixo carbono, a energia solar tem se destacado devido à ampla disponibilidade do recurso solar e ao contínuo avanço tecnológico dos sistemas de conversão fotovoltaica. Esse crescimento tem sido particularmente expressivo em países de baixa latitude, onde a elevada disponibilidade de radiação solar ao longo do ano favorece a implementação de sistemas de geração distribuída e usinas solares de grande escala (KAMBEZIDIS et al., 2016; DUFFIE; BECKMAN, 2013).

Nesse contexto, a estimativa precisa da irradiância solar incidente na superfície terrestre torna-se um fator fundamental para a avaliação do desempenho e da viabilidade técnica de sistemas fotovoltaicos, uma vez que a eficiência da geração de energia desses sistemas está diretamente condicionada à quantidade de energia solar disponível para conversão. Entretanto, a radiação solar que atinge a superfície terrestre sofre significativa modulação ao longo de sua trajetória na atmosfera, em decorrência de processos de absorção, espalhamento e reflexão promovidos por gases atmosféricos, vapor d'água, nuvens e partículas em suspensão conhecidas como aerossóis atmosféricos (LIOU, 2002).

Os aerossóis atmosféricos consistem em partículas sólidas ou líquidas suspensas na atmosfera, provenientes tanto de fontes naturais quanto de atividades antrópicas, incluindo poeira mineral, sal marinho, emissões industriais e partículas provenientes da queima de biomassa (HINDS, 2008; RAMANATHAN et al., 2001). Essas partículas exercem influência significativa sobre o balanço radiativo do sistema Terra-atmosfera, uma vez que interagem com a radiação solar por meio de processos de absorção e espalhamento.

Estudos clássicos sobre os efeitos radiativos dos aerossóis demonstram que essas partículas atuam tanto por mecanismos diretos, associados à modificação do fluxo radiativo incidente, quanto por mecanismos indiretos, relacionados à alteração das propriedades microfísicas das nuvens, influenciando sua refletividade, espessura óptica e tempo de vida (HAYWOOD; BOUCHER, 2000; ANDREAE; ROSENFELD, 2008).

Esses processos radiativos exercem influência significativa sobre o balanço energético da superfície, impactando não apenas sistemas naturais, mas também sistemas tecnológicos de aproveitamento da energia solar. Nesse sentido, a presença de material particulado na coluna atmosférica pode reduzir de forma expressiva a irradiância incidente na superfície terrestre, afetando diretamente a potência gerada por sistemas fotovoltaicos, sobretudo em regiões sujeitas a emissões recorrentes de aerossóis de origem antrópica (GÓMEZ-AMO et al., 2019).

Investigações empíricas indicam que episódios de elevada concentração de aerossóis podem ocasionar reduções substanciais na geração de energia de usinas fotovoltaicas, com impactos que variam em função da composição química, das propriedades ópticas e da distribuição de tamanho das partículas presentes na atmosfera (HERMAN-CZEZUCH et al., 2022). Estudos recentes também indicam que esses impactos podem representar perdas relevantes na produção de energia solar em diferentes regiões do mundo.

Avaliações de modelagem em escala global sugerem que a presença de aerossóis pode reduzir a geração fotovoltaica em valores médios que variam entre 4% e 12%, podendo ultrapassar 25% em regiões caracterizadas por elevada carga atmosférica de material particulado (LI et al., 2024). Esses impactos tornam-se particularmente relevantes em áreas sujeitas à ocorrência de queimadas sazonais e emissões associadas à combustão de biomassa, onde a concentração de aerossóis apresenta elevada variabilidade temporal.

No Brasil, especialmente nas regiões da Amazônia e do Cerrado, a ocorrência de queimadas durante os períodos de estiagem constitui uma das principais fontes de aerossóis atmosféricos. A emissão dessas partículas pode alterar significativamente as propriedades ópticas da atmosfera, reduzindo a transmissão da radiação solar e modificando o balanço radiativo regional. Nessas condições, mesmo regiões caracterizadas por elevados índices de insolação anual podem apresentar reduções relevantes na disponibilidade de radiação solar incidente na superfície (DEL HOYO et al., 2023).

Para a quantificação da carga atmosférica de aerossóis e de seus impactos sobre a transmissão da radiação solar, a profundidade óptica de aerossóis (Aerosol Optical Depth – AOD) tem sido amplamente utilizada como um dos principais parâmetros atmosféricos em estudos de interação radiação–aerossóis. A AOD representa uma medida integrada da extinção da radiação solar ao longo da coluna atmosférica, refletindo a quantidade de material particulado capaz de absorver e espalhar radiação eletromagnética.

Estimativas de AOD podem ser obtidas tanto por meio de observações de sensoriamento remoto orbital quanto por medições em superfície. Sensores orbitais, como o Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), permitem monitorar a distribuição espacial e temporal dos aerossóis em escala regional e global, enquanto observações realizadas por fotômetros solares da rede AErosol RObotic NETwork (AERONET) fornecem medidas de alta precisão da profundidade óptica de aerossóis e de propriedades ópticas associadas. A integração dessas duas fontes de dados tem sido amplamente utilizada para a validação e aprimoramento de estimativas atmosféricas derivadas de satélite.

Além da utilização direta da AOD, métricas derivadas da radiação solar têm sido empregadas para avaliar os efeitos radiativos associados à presença de aerossóis. Entre essas métricas destaca-se a irradiância relativa, definida como a razão entre a irradiância global observada na superfície e a irradiância esperada sob condições atmosféricas de referência. Esse parâmetro permite quantificar a atenuação radiativa associada à presença de aerossóis e nuvens, possibilitando a análise da modulação da radiação solar incidente na superfície terrestre (CIRINO et al., 2014).

Adicionalmente, abordagens baseadas no conceito de forçante radiativa de aerossóis têm sido utilizadas para investigar os impactos dessas partículas sobre o balanço energético da superfície. A forçante radiativa representa a diferença entre o fluxo radiativo observado e aquele que seria esperado na ausência de aerossóis, permitindo avaliar quantitativamente o efeito dessas partículas sobre o sistema radiativo atmosférico e, consequentemente, sobre a disponibilidade de energia solar para sistemas fotovoltaicos. Apesar dos avanços recentes na compreensão dos efeitos atmosféricos sobre a geração de energia solar, a relação entre variáveis atmosféricas associadas à presença de aerossóis e a produção energética de sistemas fotovoltaicos nem sempre se manifesta de forma linear ou estatisticamente evidente.

Diante desse contexto, compreender a influência da variabilidade da carga atmosférica de aerossóis sobre a geração fotovoltaica constitui uma etapa fundamental para o aprimoramento de modelos de previsão energética e para o planejamento de sistemas de geração distribuída em regiões sujeitas à degradação da qualidade do ar. Nesse sentido, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a influência dos aerossóis atmosféricos sobre a geração de energia de um sistema fotovoltaico instalado na região sudoeste do estado de Mato Grosso, integrando dados reais de geração, variáveis micrometeorológicas e estimativas de profundidade óptica de aerossóis obtidas por sensoriamento remoto orbital e medições em superfície.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho busca avaliar a influência dos aerossóis atmosféricos sobre a geração de energia de um sistema fotovoltaico instalado na região sudoeste do estado de Mato Grosso, integrando dados reais de geração, variáveis meteorológicas e medidas de profundidade óptica de aerossóis provenientes de sensoriamento remoto e medições em superfície.

2.2 Objetivos específicos

A fim de alcançar o objetivo geral, foi necessário o estabelecimento dos seguintes objetivos específicos:

- 1- Disponibilizar uma revisão bibliométrica, identificando, categorizando e avaliando criticamente, de forma sistemática, as metodologias utilizadas na literatura para o estudo de aerossóis e energia fotovoltaica.
- 2- Avaliar a aplicação do produto MAIAC MODIS para analisar os efeitos dos aerossóis na geração de energia fotovoltaica.
- 3- Avaliar as influências das emissões de queimadas na potência gerada de energia fotovoltaica.

O primeiro objetivo específico foi necessário para que se identificasse na literatura quais seriam as metodologias, variáveis e dispositivos mais utilizados nos diferentes estudos disponíveis, além de entender qual delas poderia ser melhor aplicada para a região de estudos. O segundo foi necessário para contornar a ausência de equipamentos de medição de dados atmosféricos de solo na região estudada e o terceiro objetivo foi realizado através de análises estatísticas robustas que permitiram realizar as inferências no trabalho.

2.3 Relação com os objetivos de desenvolvimento sustentáveis

De acordo com o atual enfrentamento às mudanças climáticas por todo o mundo, a Organização das Nações Unidas (ONU) elaborou uma lista de objetivos de desenvolvimento,

chamados de Objetivos de Desenvolvimento Sustentáveis (ODS) como uma ação global para acabar com a pobreza, proteger o meio ambiente e o clima e essa lista de pontos de atenção tem como meta principal atingir a agenda do clima de 2030.

O presente trabalho tem relação direta com o ODS 07 – Energia limpa e acessível, que traz como tema central: “Assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todas e todos”. Além disso, seu subitem 7.1 visa “assegurar o acesso universal, confiável, moderno e a preços acessíveis a serviços de energia, até 2030”, o que somente será possível ao se possuir domínio total a respeito da fonte de cada tipo de sistema de geração de energia.

3 REVISÃO DE LITERATURA

Diante da necessidade de avanço nas técnicas de análise das interações atmosféricas, diversas ferramentas foram desenvolvidas, cada uma com um foco de análise e parâmetros de medição distintos. O presente trabalho realizou, primeiramente, uma revisão de literatura com foco no entendimento dos fundamentos necessários para a aplicação do estudo realizado e, em um segundo momento, foi conduzida uma consulta à literatura com o objetivo de identificar as metodologias mais utilizadas e adequadas para avaliar o impacto dos aerossóis em sistemas fotovoltaicos. Após a identificação dessas metodologias, foi realizada uma investigação a respeito de quais variáveis são mais adequadas para sua aplicação e quais dispositivos ou modelos apresentam melhor desempenho para sua obtenção.

A segunda etapa da revisão de literatura resultou em um trabalho de revisão cientométrica, apresentado na íntegra no anexo 2 deste documento.

3.1 Fundamentação teórica

3.1.1 Radiação Solar

A radiação proveniente do Sol constitui a principal fonte de energia para o sistema climático da Terra, sendo responsável por controlar processos atmosféricos, oceânicos e biológicos. A energia emitida pelo Sol resulta de reações termonucleares que ocorrem em seu núcleo, produzindo radiação eletromagnética que se propaga pelo espaço e atinge a Terra em diferentes comprimentos de onda (LIU; JORDAN, 1960).

A distribuição espectral da radiação solar incidente na atmosfera terrestre concentra-se principalmente nas regiões do ultravioleta, visível e infravermelho próximo. Ao atingir o topo da atmosfera, a radiação solar apresenta um fluxo médio conhecido como constante solar, com valor aproximado de 1361 W m^{-2} , embora pequenas variações ocorram em função da atividade solar e da distância orbital da Terra (IPCC, 2021).

Durante sua propagação pela atmosfera, a radiação solar sofre diversos processos físicos, incluindo absorção, espalhamento e reflexão, os quais são determinados pelas propriedades dos constituintes atmosféricos, como gases, nuvens e partículas em suspensão (LIU; JORDAN, 1960; LIOU, 2002). Esses processos modificam tanto a intensidade quanto a distribuição angular da radiação que efetivamente atinge a superfície terrestre.

A radiação solar que alcança o solo é geralmente dividida em três componentes principais: radiação direta, radiação difusa e radiação global. A radiação direta corresponde à fração que chega à superfície sem sofrer espalhamento significativo, enquanto a radiação difusa

resulta do espalhamento da radiação solar pelas moléculas do ar, aerossóis e nuvens. A soma dessas duas contribuições constitui a radiação global incidente na superfície (LIOU, 2002).

A disponibilidade de radiação solar na superfície terrestre desempenha papel fundamental em diversas aplicações, incluindo processos climáticos, balanço energético da superfície e sistemas de geração de energia renovável, como a geração de eletricidade por meio de sistemas fotovoltaicos (DUFFIE; BECKMAN, 2013).

3.1.2 Aerossóis Atmosféricos

Aerossóis atmosféricos são definidos como suspensões de partículas sólidas ou líquidas dispersas no ar, com diâmetros que variam tipicamente entre alguns nanômetros e dezenas de micrômetros (HINDS, 2008). Essas partículas podem ter origem natural ou antrópica e desempenham papel importante em diversos processos atmosféricos, incluindo o balanço radiativo da Terra e a formação de nuvens.

Esse tipo de material particulado pode ter origem natural no ambiente, como poeira mineral levantada pelo vento, partículas provenientes de erupções vulcânicas, sal marinho gerado pela ação das ondas oceânicas e aerossóis biogênicos emitidos pela vegetação. Por outro lado, atividades antrópicas associadas principalmente à queima de combustíveis fósseis, processos industriais, queimadas e atividades agrícolas também são responsáveis pela emissão de grande quantidade de aerossóis na atmosfera (ANDREAE; ROSENFELD, 2008).

A composição química dos aerossóis é altamente variável, podendo incluir sulfatos, nitratos, compostos orgânicos, carbono negro, poeira mineral e partículas marinhas. Essa diversidade de composição influencia diretamente suas propriedades ópticas, higroscópicas e radiativas. Além da composição química, uma das formas mais utilizadas para classificar aerossóis atmosféricos baseia-se na distribuição do tamanho das partículas, geralmente representada em termos de diâmetro aerodinâmico. Nessa classificação, os aerossóis são frequentemente divididos em moda fina e moda grossa, de acordo com os processos de formação e com suas características físicas (HINDS, 2008).

A moda fina compreende partículas com diâmetros tipicamente inferiores a aproximadamente 2,5 μm , sendo frequentemente associadas a processos de combustão e formação secundária na atmosfera. Entre os principais componentes dessa fração encontram-se sulfatos, nitratos, compostos orgânicos e partículas de carbono provenientes da queima de biomassa e combustíveis fósseis. Essas partículas possuem tempo de permanência relativamente maior na atmosfera e podem ser transportadas por longas distâncias, além de

apresentarem maior resistência à eliminação devido ao seu tamanho reduzido (RATNAPARKHI et al., 2023).

Já a moda grossa corresponde a partículas com diâmetros superiores a aproximadamente 2,5 μm , geralmente originadas por processos mecânicos, como a ressuspensão de poeira mineral pelo vento ou a geração de aerossóis marinhos pela ação das ondas. Essas partículas tendem a se depositar na superfície com mais facilidade devido ao seu tamanho, o que resulta em tempo de permanência na atmosfera mais curto e em uma distribuição espacial mais próxima de suas fontes de emissão (HINDS, 2008).

Essa distinção entre moda fina e moda grossa é particularmente importante em estudos de interação aerossol–radiação, uma vez que o tamanho das partículas influencia diretamente seus processos de espalhamento e absorção da radiação solar (LIOU, 2002). Entre os diferentes tipos de aerossóis presentes na atmosfera destaca-se o carbono negro (black carbon – BC), formado principalmente durante processos de combustão incompleta de matéria orgânica e combustíveis fósseis. Fontes importantes de emissão incluem a queima de biomassa, motores a diesel, atividades industriais e queimadas agrícolas (BOND et al., 2013).

O carbono negro apresenta propriedades ópticas particulares, caracterizando-se por forte capacidade de absorção da radiação solar em uma ampla faixa do espectro visível e infravermelho próximo. Devido a essa característica, o BC é considerado um dos aerossóis mais relevantes do ponto de vista climático, pois contribui para o aquecimento da atmosfera ao absorver energia solar e reduzir a quantidade de radiação refletida de volta ao espaço (BOND et al., 2013). Além do efeito direto sobre a radiação solar, o carbono negro também pode influenciar processos microfísicos de nuvens e modificar o balanço energético da superfície quando depositado sobre superfícies altamente refletivas, como neve e gelo, reduzindo seu albedo (IPCC, 2021).

3.1.3 Interação entre Aerossóis e a Radiação Solar

A presença de aerossóis na atmosfera altera significativamente a propagação da radiação solar, principalmente por meio de processos de espalhamento e absorção. Essas interações modificam o balanço radiativo da Terra e influenciam a quantidade de energia solar disponível na superfície (LIOU, 2002). O espalhamento da radiação solar ocorre quando partículas desviam a trajetória dos fótons incidentes em diferentes direções.

Dependendo do tamanho e da composição das partículas, esse espalhamento pode ocorrer segundo diferentes regimes físicos, como espalhamento de Rayleigh, quando o feixe de

luz incide em partículas muito menores que o comprimento de onda do feixe incidente, ou espalhamento de Mie, quando o feixe de luz incide em partículas com dimensões próximas ao comprimento de onda da radiação incidente (BOHREN; HUFFMAN, 1983).

Por outro lado, alguns aerossóis apresentam capacidade significativa de absorver radiação solar. Partículas ricas em carbono negro, por exemplo, possuem forte absorção no espectro visível, contribuindo para o aquecimento da atmosfera e redução da radiação que atinge a superfície (BOND et al., 2013). Esses processos resultam na diminuição da irradiância solar direta e no aumento relativo da fração difusa da radiação. Consequentemente, regiões com altas concentrações de aerossóis podem apresentar reduções significativas na radiação solar incidente na superfície, fenômeno conhecido como escurecimento global (global dimming) (WILD, 2009).

3.1.4 Coeficiente de Extinção da Radiação e Profundidade Óptica de Aerossóis

A propagação da radiação eletromagnética na atmosfera é fortemente influenciada pelos processos de espalhamento e absorção provocados pelas partículas e moléculas presentes no meio. Grande parte da luz observada no céu ou refletida por superfícies naturais não chega diretamente da fonte emissora, mas resulta de múltiplos processos de espalhamento ao longo do trajeto atmosférico (LIOU, 2002). Moléculas atmosféricas, aerossóis, gotículas de nuvem e cristais de gelo interagem continuamente com a radiação incidente, redistribuindo a energia luminosa em diferentes direções e modificando a intensidade do feixe original.

O espalhamento ocorre quando uma partícula intercepta uma onda eletromagnética incidente e reenvia parte dessa energia em diferentes direções. Esse processo depende fortemente do tamanho das partículas em relação ao comprimento de onda da radiação incidente, o que pode ser descrito pelo parâmetro de tamanho:

$$x = \frac{2\pi a}{\lambda} \quad [1]$$

onde x representa o parâmetro de tamanho da partícula, a é o raio da partícula e λ corresponde ao comprimento de onda da radiação incidente.

Quando $x \ll 1$, o espalhamento ocorre no regime de Rayleigh, característico da interação da radiação visível com moléculas atmosféricas. Já quando o tamanho das partículas é comparável ou maior que o comprimento de onda da radiação incidente ($x \geq 1$), o

espalhamento ocorre no regime de Mie, típico da interação da radiação com aerossóis, gotículas de nuvens e outras partículas atmosféricas de maior dimensão (LIOU, 2002).

Além do espalhamento, a radiação também pode ser parcialmente absorvida pelas partículas atmosféricas, sendo convertida em outras formas de energia. A combinação desses dois processos resulta na extinção da radiação, que corresponde à atenuação do feixe luminoso ao longo de seu percurso na atmosfera. No estudo da transferência radiativa é comum utilizar o conceito de seção de choque (*cross section*), que representa a quantidade de energia removida do feixe incidente por uma partícula. A seção de choque de extinção é definida como a soma das contribuições de espalhamento e absorção:

$$\sigma_e = \sigma_s + \sigma_a \quad [2]$$

onde σ_e representa a seção de choque de extinção, σ_s a seção de choque de espalhamento e σ_a a seção de choque de absorção. Multiplicando-se a seção de choque de extinção pela densidade numérica de partículas N , obtém-se o coeficiente de extinção da radiação:

$$\beta_e = N\sigma_e \quad [3]$$

onde β_e representa o coeficiente de extinção e expressa a taxa de atenuação da radiação por unidade de distância ao longo do meio atmosférico (LIOU, 2002). A atenuação da radiação ao atravessar a atmosfera pode ser descrita pela Lei de Beer–Lambert–Bouguer, que relaciona a intensidade da radiação transmitida com as propriedades ópticas do meio:

$$I = I_0 e^{-\tau} \quad [4]$$

onde I representa a intensidade da radiação após atravessar o meio, I_0 corresponde à intensidade inicial da radiação e τ representa a profundidade óptica. A profundidade óptica corresponde a uma grandeza adimensional que expressa a atenuação total da radiação ao longo de uma coluna atmosférica. Essa grandeza pode ser definida como a integral vertical do coeficiente de extinção ao longo da atmosfera:

$$\tau = \int_0^\infty \beta_e(z) dz \quad [5]$$

No caso específico dos aerossóis atmosféricos, essa grandeza é denominada profundidade óptica de aerossóis (*Aerosol Optical Depth – AOD*), representando uma medida integrada da quantidade total de partículas presentes na coluna atmosférica (KAUFMAN; TANRÉ; BOUCHER, 2002).

Outra forma de expressar a atenuação da radiação solar na atmosfera considera explicitamente o caminho óptico percorrido pela radiação, representado pela massa de ar atmosférica. Nesse caso, a Lei de Beer–Lambert pode ser escrita como:

$$I = I_0 e^{-AOD \cdot m} \quad [6]$$

onde m representa a massa de ar atmosférica, que depende do ângulo zenital solar. Essa relação evidencia que o aumento da profundidade óptica de aerossóis resulta em uma redução exponencial da irradiância solar incidente na superfície.

Valores elevados de AOD indicam maior concentração de partículas na atmosfera e, consequentemente, maior atenuação da radiação solar incidente. Por esse motivo, esse parâmetro é amplamente utilizado em estudos climáticos e ambientais para quantificar a carga de aerossóis na atmosfera. Além da magnitude da AOD, outra propriedade importante frequentemente utilizada na caracterização de aerossóis atmosféricos é o Expoente de Ångström, que descreve a dependência espectral da profundidade óptica em relação ao comprimento de onda da radiação. Essa relação pode ser expressa pela seguinte equação empírica:

$$AOD(\lambda) = \beta \lambda^{-\alpha} \quad [7]$$

onde λ representa o comprimento de onda, β está relacionado à quantidade total de aerossóis presentes na atmosfera e α corresponde ao Expoente de Ångström. O Expoente de Ångström fornece uma indicação indireta do tamanho predominante das partículas atmosféricas. Em geral, valores elevados de α (tipicamente maiores que 1) indicam predominância de partículas pequenas associadas à moda fina, frequentemente relacionadas a processos de combustão e formação secundária de aerossóis. Por outro lado, valores baixos de α (próximos de zero) indicam predominância de partículas maiores, características da moda grossa, como poeira mineral ou aerossóis marinhos (HOLBEN et al., 1998; PALÁCIOS et al., 2014).

Devido a diversidade de equipamentos de aquisição de profundidade óptica de aerossóis podem ser encontradas medidas em comprimentos de onda diferentes, como é o caso da medida coletada pelo sensor MODIS e pela rede AERONET. O sensor MODIS, presente nos satélites Aqua e Terra, por exemplo, fazem a medida da AOD para o comprimento de onda em 550nm, já a rede AERONET coleta a AOD em vários comprimentos de onda, porém quando há necessidade de validação de dados utiliza-se para o comprimento de onda de 500nm. Para que se possa realizar a validação de dados é necessário se converter o valor medido, o que pode ser realizado utilizando-se a relação:

$$AOD_{550} = AOD_{500} \lambda \left(\frac{550}{500} \right)^{-\alpha} \quad [8]$$

Observações da profundidade óptica de aerossóis podem ser obtidas tanto por instrumentos em superfície quanto por sensoriamento remoto orbital. Entre as redes de monitoramento em superfície destaca-se a AERONET, que fornece medições de alta precisão da AOD por meio de fotômetros solares calibrados e padronizados (HOLBEN et al., 1998). Em escala global, sensores orbitais também permitem estimar a distribuição espacial dos aerossóis atmosféricos, como o sensor MODIS a bordo dos satélites Terra e Aqua (REM ER et al., 2005).

Entre os algoritmos de recuperação mais avançados utilizados nesse sensor destaca-se o MAIAC (Multi-Angle Implementation of Atmospheric Correction), que utiliza séries temporais e múltiplos ângulos de observação para melhorar a estimativa das propriedades ópticas dos aerossóis e reduzir incertezas associadas à refletância da superfície. A confiabilidade desses produtos orbitais é frequentemente avaliada por meio da comparação com medições da rede AERONET, permitindo validar as estimativas de AOD derivadas de sensoriamento remoto (RUDKE et al., 2023).

3.1.5 Irradiância Relativa

A irradiância relativa é um parâmetro amplamente utilizado em estudos de interação entre a radiação solar e a atmosfera para avaliar a influência de constituintes atmosféricos, como aerossóis e nuvens, sobre a quantidade de radiação que atinge a superfície terrestre. De forma geral, esse parâmetro representa a razão entre a irradiância solar observada em determinadas condições atmosféricas e a irradiância esperada sob condições atmosféricas de referência, normalmente associadas a situações de céu claro e baixa carga de aerossóis.

Matematicamente, a irradiância relativa pode ser expressa como:

$$I_r = \frac{G}{G_{ref}} \quad [9]$$

onde:

- I_r representa a irradiância relativa;
- G corresponde à irradiância solar de onda curta medida na superfície (W m^{-2});
- G_{ref} representa a irradiância esperada sob condições atmosféricas de referência ou céu claro.

Essa razão permite normalizar os valores de irradiância observados, reduzindo a influência do ciclo diurno da radiação solar e das variações sazonais associadas à geometria

Sol–Terra. Dessa forma, torna-se possível avaliar de maneira mais direta o impacto das propriedades ópticas da atmosfera sobre a atenuação da radiação solar incidente (LIU; JORDAN, 1960).

Em estudos de interação aerossol–radiação, a irradiância relativa é particularmente útil para quantificar a redução da irradiância solar causada pela presença de partículas atmosféricas. Valores de I_r inferiores à unidade indicam que a radiação incidente na superfície foi atenuada por processos de extinção associados à presença de aerossóis ou nuvens na atmosfera. Por outro lado, valores próximos de 1 indicam condições atmosféricas próximas às condições de referência.

Uma abordagem semelhante foi utilizada por Glauber G. Cirino em estudos sobre o balanço radiativo de ondas curtas na Amazônia, nos quais a irradiância relativa foi empregada para investigar os efeitos combinados de aerossóis e nuvens sobre a radiação solar incidente (CIRINO et al., 2014). Nesse contexto, a irradiância relativa foi definida como:

$$f = \frac{S}{S_0} \times 100 \quad [10]$$

onde S representa a irradiância solar global medida na superfície e S_0 corresponde à irradiância esperada sob condições de céu claro, geralmente considerando valores baixos de profundidade óptica de aerossóis, tipicamente $AOD < 0,1$. A multiplicação por 100 permite expressar a irradiância relativa em termos percentuais, facilitando a interpretação das variações na disponibilidade de radiação solar.

A determinação da irradiância de referência S_0 constitui uma etapa fundamental nessa metodologia, uma vez que ela define a base de comparação entre condições atmosféricas distintas. Em muitos estudos, essa irradiância de céu claro é estimada a partir da identificação de períodos livres de nuvens utilizando critérios baseados em medições de radiação solar ou em dados de sensoriamento remoto (GU et al., 2003; OLIVEIRA et al., 2007).

Quando a irradiância de céu claro não está diretamente disponível, uma abordagem alternativa consiste em utilizar o índice de céu claro (*clearness index*), representado por k_t . Esse índice é definido como a razão entre a irradiância solar global medida na superfície e a irradiância solar no topo da atmosfera:

$$k_t = \frac{S}{S_e} \quad [11]$$

onde S representa a irradiância global medida na superfície e S_e corresponde à irradiância solar no topo da atmosfera. Para condições de céu claro, define-se um índice de clareza de referência

k_t^* , correspondente à situação em que não há presença de nuvens e a carga de aerossóis é mínima. A razão entre o índice de clareza observado e o índice de clareza de referência fornece uma estimativa da irradiância relativa, permitindo avaliar a influência das condições atmosféricas sobre a radiação solar incidente (CIRINO et al., 2014).

A utilização da irradiância relativa apresenta diversas vantagens em estudos atmosféricos, pois permite identificar variações na disponibilidade de radiação solar associadas a mudanças na turbidez atmosférica, na carga de aerossóis ou na cobertura de nuvens. Dessa forma, essa abordagem tem sido amplamente aplicada em estudos de balanço radiativo, interação aerossol–radiação e em análises do impacto de partículas atmosféricas sobre a produtividade de ecossistemas e o desempenho de sistemas de geração de energia solar.

Além disso, variações na irradiância relativa podem estar diretamente associadas a mudanças na profundidade óptica de aerossóis e nas propriedades microfísicas das nuvens, tornando esse parâmetro uma ferramenta importante para investigar os efeitos atmosféricos sobre a radiação solar incidente na superfície terrestre.

3.1.6 Forçante Radiativa de Aerossóis

A forçante radiativa é um parâmetro que representa a alteração no balanço energético do sistema Terra–atmosfera causada pela introdução ou modificação de um agente climático. Esse conceito é amplamente utilizado em estudos climáticos para quantificar como determinados componentes atmosféricos influenciam o fluxo de radiação que entra e sai do sistema terrestre. No caso dos aerossóis atmosféricos, a forçante radiativa está associada às mudanças na absorção e no espalhamento da radiação solar provocadas pela presença dessas partículas na atmosfera (IPCC, 2021).

Como mencionado na seção 3.1.3 os aerossóis interagem com a radiação solar principalmente por meio de dois processos físicos fundamentais: o espalhamento e a absorção. Aerossóis predominantemente dispersivos, como sulfatos e partículas orgânicas, refletem parte da radiação solar incidente de volta ao espaço, produzindo uma redução no fluxo radiativo que alcança a superfície terrestre e resultando em uma forçante radiativa negativa, associada a um efeito de resfriamento. Em contrapartida, aerossóis fortemente absorvedores, como o carbono negro (black carbon), absorvem radiação solar e aquecem a camada atmosférica onde estão presentes, podendo gerar uma forçante radiativa positiva (BOND et al., 2013; IPCC, 2021).

A magnitude da forçante radiativa de aerossóis depende de diversos fatores, incluindo a concentração de partículas na atmosfera, sua composição química, distribuição vertical,

propriedades ópticas e características microfísicas. Além disso, a interação entre aerossóis e nuvens pode modificar propriedades como albedo e tempo de vida das nuvens, produzindo efeitos indiretos adicionais no balanço radiativo do sistema climático (RAMANATHAN et al., 2001; IPCC, 2021).

Uma forma amplamente utilizada para estimar a forçante radiativa de aerossóis na superfície consiste em analisar as variações no fluxo de radiação solar associadas à presença de partículas atmosféricas. Nesse contexto, a profundidade óptica de aerossóis (AOD) desempenha papel fundamental, pois representa uma medida integrada da carga de aerossóis presente na coluna atmosférica e, conseqüentemente, da capacidade dessas partículas de atenuar a radiação solar incidente (HOLBEN et al., 1998). Assim, aumentos nos valores de AOD geralmente estão associados a reduções no fluxo de radiação solar que atinge a superfície terrestre.

Diversos estudos têm demonstrado que regiões afetadas por emissões intensas de aerossóis, como aquelas impactadas por queimadas de biomassa, apresentam reduções significativas no fluxo de radiação solar incidente. Nessas situações, a presença de partículas na atmosfera provoca uma diminuição da irradiância disponível na superfície, afetando processos ambientais e energéticos, incluindo o balanço de energia na superfície e o desempenho de sistemas de geração de energia solar (PROCÓPIO et al., 2004; PALÁCIOS et al., 2014).

Uma abordagem simplificada para estimar a forçante radiativa direta de aerossóis sobre a superfície consiste em comparar o fluxo de radiação observado com um valor de referência associado a condições atmosféricas de baixa carga de aerossóis. Nesse caso, a forçante radiativa pode ser expressa em termos da radiação fotossinteticamente ativa como:

$$ARF = PAR_{bac} - PAR \quad [12]$$

onde:

- ARF representa a forçante radiativa de aerossóis na superfície ($W\ m^{-2}$);
- PAR_{bac} corresponde ao fluxo de radiação fotossinteticamente ativa em condições de background atmosférico;
- PAR representa o fluxo de radiação medido na presença de aerossóis.

Valores negativos de ARF indicam uma redução do fluxo radiativo incidente na superfície devido à presença de aerossóis na atmosfera (PALÁCIOS et al., 2014)

Além da análise do fluxo radiativo na superfície, estudos mais recentes têm buscado avaliar diretamente os impactos da presença de aerossóis sobre sistemas de geração de energia solar fotovoltaica. Nesse contexto, Gómez-Amo et al. (2019) propuseram uma metodologia que

relaciona a presença de aerossóis com a variação da potência gerada por usinas fotovoltaicas, introduzindo os conceitos de Power Aerosol Radiative Forcing (PARF) e Power Aerosol Forcing Efficiency (PAFE).

O parâmetro PARF representa a diferença entre a potência elétrica gerada por um sistema fotovoltaico sob determinadas condições atmosféricas e a potência que seria produzida sob condições de referência com baixa carga de aerossóis. Matematicamente, esse parâmetro pode ser expresso como:

$$PARF(t) = P(t) - P_0(t) \quad [13]$$

onde:

- $P(t)$ representa a potência gerada pelo sistema fotovoltaico em um instante t sob qualquer condição atmosférica;
- $P_0(t)$ corresponde à potência gerada sob condições atmosféricas de referência, caracterizadas por baixa concentração de aerossóis.

Como a magnitude da redução de potência depende da quantidade de aerossóis presentes na atmosfera, Gómez-Amo et al. (2019) também definiram a eficiência da forçante radiativa na potência, denominada PAFE, que representa a variação da potência por unidade de profundidade óptica de aerossóis. Esse parâmetro pode ser calculado por meio da expressão:

$$PAFE(t) = \frac{P(t) - P_0(t)}{AOD(t) - AOD_0(t)} \quad [14]$$

onde:

- $AOD(t)$ representa a profundidade óptica de aerossóis observada no instante t ;
- $AOD_0(t)$ corresponde à AOD associada às condições atmosféricas de referência.

A principal vantagem da utilização do parâmetro PAFE é que ele permite avaliar a sensibilidade da produção de energia fotovoltaica à presença de aerossóis de forma independente da quantidade absoluta de partículas na atmosfera. Dessa forma, esse indicador pode revelar diferenças associadas ao tipo de aerossol predominante, uma vez que partículas com diferentes propriedades ópticas produzem distintos efeitos sobre a radiação solar incidente (GÓMEZ-AMO et al., 2019).

Além da análise instantânea da potência, essa metodologia também permite avaliar o impacto dos aerossóis na produção diária de energia elétrica. A energia diária gerada por um sistema fotovoltaico pode ser obtida por meio da integração temporal da potência ao longo do dia:

$$E_D = \int_0^{24} P(t) dt \quad [15]$$

A variação da energia diária associada à presença de aerossóis pode então ser expressa como:

$$\Delta E_D = \int_0^{24} [P(t) - P_0(t)] dt \quad [16]$$

De forma análoga, é possível definir a variação da energia diária por unidade de AOD como:

$$\Delta E_{ED} = \int_0^{24} PAFE(t) dt \quad [17]$$

Esses parâmetros permitem quantificar de forma integrada o impacto da carga de aerossóis na produção de energia solar ao longo de um dia completo. Dessa forma, a metodologia baseada em PARF e PAFE constitui uma ferramenta importante para investigar a relação entre propriedades ópticas de aerossóis, variações no fluxo radiativo incidente e o desempenho de sistemas fotovoltaicos (GÓMEZ-AMO et al., 2019).

A aplicação dessas abordagens em regiões sujeitas a elevada variabilidade na concentração de aerossóis, como áreas afetadas por queimadas de biomassa, tem demonstrado reduções significativas no fluxo de radiação solar incidente e, conseqüentemente, na geração de energia fotovoltaica. Nessas regiões, aumentos nos valores de AOD estão frequentemente associados a reduções no fluxo de radiação solar na superfície, evidenciando a importância da caracterização das propriedades ópticas da atmosfera para a avaliação do potencial energético solar e para a compreensão dos processos radiativos no sistema climático (PROCÓPIO et al., 2004; PALÁCIOS et al., 2014).

3.1.7 Geração de Energia Solar Fotovoltaica

A geração de energia solar fotovoltaica baseia-se na conversão direta da radiação solar em energia elétrica por meio do efeito fotovoltaico, fenômeno físico observado em materiais semicondutores quando expostos à radiação luminosa (GREEN, 2003). Em módulos fotovoltaicos, fótons incidentes sobre o material semicondutor transferem energia aos elétrons da estrutura cristalina, permitindo sua movimentação e gerando corrente elétrica. O desempenho desses sistemas depende diretamente da quantidade de radiação solar incidente, além de fatores como temperatura, espectro da radiação e condições atmosféricas (DUFFIE; BECKMAN, 2013).

A presença de aerossóis na atmosfera pode influenciar significativamente a geração fotovoltaica ao reduzir a irradiância solar direta que atinge a superfície. Embora o aumento da radiação difusa possa compensar parcialmente essa redução em alguns sistemas, concentrações elevadas de aerossóis geralmente resultam em diminuição da produção de energia (LI et al., 2017).

Nesse contexto, a utilização de produtos de profundidade óptica de aerossóis derivados de satélite, como os obtidos pelo sensor MODIS por meio do algoritmo MAIAC, permite investigar a relação entre carga de aerossóis e disponibilidade de radiação solar. A comparação dessas estimativas com medições da rede AERONET contribui para avaliar a confiabilidade dos dados utilizados e aprimorar análises relacionadas ao impacto atmosférico na geração de energia solar.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Local de realização do trabalho

A usina fotovoltaica analisada neste estudo está localizada no município de Pontes e Lacerda, situado na região sudoeste do estado de Mato Grosso, Brasil. O município integra a região conhecida como Vale do Alto Guaporé, que engloba diversos municípios do sudoeste mato-grossense e está inserida na bacia hidrográfica do rio Guaporé, afluente do rio Madeira no sistema hidrográfico amazônico (APARECIDA et al., 2009). A Figura 9 apresenta a localização onde foi desenvolvido o estudo no contexto do território brasileiro e do estado de Mato Grosso, que está marcado pelo ponto em vermelho, além de os locais onde estão instaladas as estações micrometeorológicas descritas na seção 4.2.

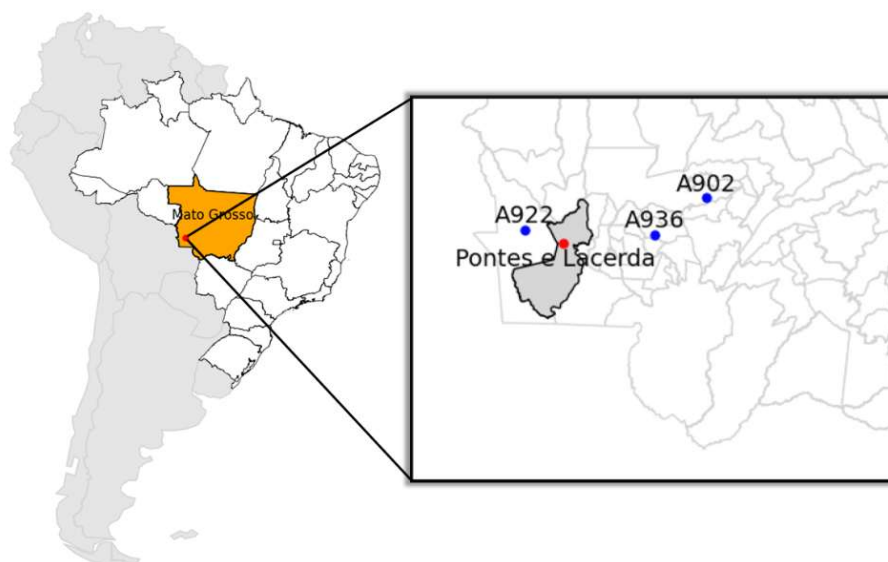


Figura 1 - Localização da usina fotovoltaica de estudo.

Do ponto de vista físico-geográfico, essa região caracteriza-se pela presença de áreas de planícies e depressões associadas ao vale do rio Guaporé, além de áreas adjacentes do Planalto dos Parecis. A região apresenta forte vocação para atividades agropecuárias, que constituem uma das principais bases econômicas locais, especialmente relacionadas à pecuária e à produção agrícola.

O clima predominante na região é classificado como tropical de savana (Aw), segundo a classificação climática de Köppen, sendo caracterizado pela ocorrência de duas estações bem definidas ao longo do ano: uma estação chuvosa durante os meses de primavera e verão e uma estação seca predominante no inverno austral. A precipitação média anual na região é da ordem

de aproximadamente 1500 mm, enquanto a temperatura média anual situa-se em torno de 24 °C, apresentando variações relativamente pequenas ao longo do ano (EMBRAPA, 2019).

O regime pluviométrico regional apresenta elevada sazonalidade, característica típica das áreas de Cerrado e de transição amazônica no estado de Mato Grosso. Estudos climatológicos indicam que a maior parte da precipitação anual ocorre durante a estação úmida, enquanto os meses de inverno apresentam baixos índices de precipitação e redução significativa da umidade relativa do ar, resultando em um período seco bem definido (SOUZA et al., 2013).

Do ponto de vista fitogeográfico, a vegetação natural da região apresenta características associadas à zona de transição entre os biomas Amazônia e Cerrado. A ocupação antrópica ao longo das últimas décadas tem promovido a expansão de áreas destinadas à agropecuária, resultando em significativa substituição da vegetação nativa por pastagens e áreas agrícolas.

Durante a estação seca, as condições meteorológicas da região favorecem a ocorrência de queimadas naturais e antrópicas, associadas principalmente às práticas de manejo agrícola e pecuário. Esses eventos contribuem para o aumento da concentração de aerossóis atmosféricos na coluna de ar, influenciando a qualidade do ar e modificando as propriedades ópticas da atmosfera. Como consequência, a presença de partículas em suspensão pode alterar a transmissão da radiação solar incidente na superfície terrestre, afetando o balanço radiativo regional e a disponibilidade de irradiância para sistemas de geração de energia fotovoltaica.

A usina fotovoltaica utilizada como objeto de estudo foi instalada diretamente sobre o solo, utilizando estruturas fixas e sem mecanismos de rastreamento solar. O sistema encontra-se localizado às margens de uma rodovia estadual utilizada para o escoamento de produtos agropecuários da região, o que pode contribuir para a emissão local de poeira e material particulado devido ao tráfego frequente de veículos pesados.

A área da usina apresenta cobertura vegetal composta predominantemente por gramíneas, favorecidas pelo sombreamento parcial proporcionado pelas estruturas dos módulos fotovoltaicos, que alteram o microclima local ao reduzir a radiação incidente no solo e modificar variáveis como temperatura e umidade (BARRON-GAFFORD et al., 2019; VERVLOESEM et al., 2022).

4.2 Medidas micrometeorológicas

Para a obtenção das variáveis meteorológicas, foram utilizados dados provenientes de quatro estações meteorológicas pertencentes ao Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil (INMET), localizadas nas proximidades da usina fotovoltaica analisada. Após a coleta dos

dados, foi realizado o cálculo da média entre os valores registrados pelas quatro estações, com o objetivo de obter estimativas mais representativas das condições meteorológicas regionais e reduzir possíveis incertezas associadas às medições individuais.

As informações referentes à localização e às características de aquisição de dados de cada estação meteorológica são apresentadas na Tabela 1, disponibilizada no Anexo 1. A localização geográfica das quatro estações utilizadas neste estudo encontra-se ilustrada na Figura 9. A partir dessas estações foram coletados valores de temperatura máxima diária, temperatura mínima diária e temperatura média diária. Para cada uma dessas variáveis foi calculada a média entre os valores registrados nas quatro estações, buscando minimizar possíveis inconsistências ou falhas pontuais de medição em alguma das séries observacionais.

Os dados de geração de energia elétrica foram obtidos por meio da plataforma de monitoramento do inversor do sistema fotovoltaico, abrangendo o período de 17 de julho de 2018 a 1º de dezembro de 2023. As variáveis meteorológicas coletadas foram então pareadas com os dados de geração energética considerando as mesmas datas de observação, de modo a garantir a consistência temporal entre os conjuntos de dados utilizados nas análises.

Adicionalmente, foram implementadas rotinas de pré-processamento utilizando a linguagem de programação Python, com o objetivo de realizar uma limpeza inicial dos dados de geração de energia. Durante essa etapa foram removidos registros contendo valores iguais a zero, valores ausentes identificados como *Not a Number* (NaN) e valores extremamente baixos ou elevados em relação à média da série, considerados potenciais *outliers*. Esse procedimento foi adotado para evitar que os modelos estatísticos ou computacionais capturassem padrões enviesados que não representassem adequadamente o comportamento real dos dados.

A aplicação desse tipo de filtragem é comum em estudos que utilizam dados observacionais de geração energética, uma vez que registros iguais a zero podem ocorrer em decorrência de falhas temporárias na comunicação do sistema de monitoramento ou de problemas de transmissão de dados pela rede de internet, impedindo o armazenamento adequado das medições na plataforma de monitoramento. Além disso, valores significativamente inferiores à média da série podem estar associados a períodos de manutenção do sistema fotovoltaico, durante os quais a usina pode permanecer temporariamente fora de operação por razões não relacionadas às variáveis meteorológicas analisadas neste estudo.

Antes da aplicação do processo de pré-processamento, o conjunto de dados continha 1964 registros correspondentes ao período total de aquisição de dados. Após a aplicação dos filtros descritos anteriormente, permaneceram 1410 registros válidos, os quais foram utilizados nas análises subsequentes.

4.3 Aquisição de dados

4.3.1 Dados de satélite

Foi utilizada como fonte para as análises e inferências os dados de AOD do sensor orbital a bordo de satélites, porém foram coletados dados de uma estação de medição em solo, utilizada para validação dos dados de satélite. A primeira fonte de dados de AOD foi o produto MODIS combinado entre as medições dos satélites Terra e Aqua, que foi escolhida devido a resolução espacial entregue pelas medições do produto de satélite, visto que esse produto permite visualização de grade de até 1km por 1km, enquanto outros produtos possuem resoluções de grade de até 10km por 10km.

O sensor MODIS é um radiômetro multiespectral de resolução moderada embarcado nas plataformas EOS-Terra e EOS-Aqua da National Aeronautics and Space Administration (NASA). O instrumento foi concebido para fornecer dados contínuos e de larga cobertura relacionados às propriedades físicas e biofísicas do sistema terrestre, com especial destaque para a atmosfera, superfície terrestre e oceanos. No contexto deste trabalho, foi utilizado o produto MODIS Terra+Aqua combinado, conforme disponibilizado pelo sistema de processamento e distribuição MODAPS (MODIS Adaptive Processing System), que oferece dados globalmente com revisita diária a cada 1–2 dias. (“MODIS | Aqua Project Science”, 2025)

O sensor MODIS opera em um amplo espectro eletromagnético, com 36 bandas espectrais discretas, distribuídas ao longo dos comprimentos de onda desde o visível até o infravermelho termal. Essas bandas cobrem o intervalo aproximado de 0,405 μm a 14,385 μm , incluindo regiões do visível (VIS), infravermelho próximo (NIR), infravermelho de ondas curtas (SWIR) e infravermelho termal (TIR), permitindo a detecção e quantificação de uma vasta gama de variáveis físicas, como cobertura de nuvens, propriedades da vegetação, temperatura de superfície, aerossóis e características oceânicas.

Os dados MODIS são adquiridos em três resoluções espaciais distintas:

- 250 m: aplicáveis principalmente às bandas mais sensíveis para análise da vegetação e do uso do solo (bandas 1 e 2).
- 500 m: utilizadas para produtos que requerem um equilíbrio entre detalhe espacial e cobertura ampla (bandas 3-7).
- 1 km: aplicadas às demais bandas, incluindo a maioria das bandas infravermelhas termais e atmosféricas.

Essa estrutura de resoluções permite que o sensor combine alta repetitividade temporal com capacidade de monitoramento detalhado em escalas moderadas. Os dados são adquiridos com quantização radiométrica de 12 bits, o que confere sensibilidade suficiente para detectar nuances espectrais nas diversas superfícies observadas.

A partir das medidas brutas de radiância e refletância captadas pelo MODIS, o sistema MODAPS processa uma ampla gama de produtos derivados em diferentes níveis. Esses produtos incluem, entre outros:

- Refletância de superfície (e.g., MOD09), utilizada para cálculos de índices de vegetação (como NDVI e EVI).
- Temperatura de superfície terrestre (e.g., MOD11), derivada das bandas infravermelhas termais.
- Propriedades atmosféricas e de aerossol, como densidade óptica de aerossóis.
- Oceanografia, incluindo temperatura da superfície do mar (SST) e concentração de clorofila-a.

Outros parâmetros como albedo, índice de área foliar e propriedades de nuvens também são derivados por algoritmos específicos. Os produtos MODIS são distribuídos em formatos estruturados (por exemplo, HDF) que representam dados em diferentes níveis de processamento (Level-1 a Level-3), com variações temporais diárias, compostadas e multi-diárias.

Graças à sua órbita polar síncrona e amplo campo de varredura (~2330 km de abertura lateral), os sensores MODIS em Terra e Aqua cobrem toda a superfície terrestre a cada 1 a 2 dias, garantindo alta frequência temporal. Essa característica é crucial para análises temporais de fenômenos dinâmicos como ciclos de vegetação, variações de temperatura superficial, detecção de incêndios e monitoramento de mudanças ambientais contínuas.

No presente trabalho, foi utilizado um conjunto combinado de dados MODIS provenientes tanto do satélite Terra quanto do Aqua, cujo produto específico coletado foi o MCD19As do qual foi coletada profundidade óptica de aerossóis no comprimento de onda de 550nm. A integração dos dados entre as duas plataformas permite reduzir lacunas temporais e aumentar a densidade de observações, especialmente ao gerar produtos com maior cobertura temporal ou compostos multi-diários. Essa estratégia é particularmente útil quando se deseja análise temporal mais contínua, como estimativas de temperatura da superfície, produtos de vegetação e caracterização de aerossóis.

4.3.2 Dados de estação no solo

A fim de realizar a validação dos dados de AOD coletados do sensor MODIS foram também coletados dados da profundidade óptica de aerossóis da rede AERONET, que possui uma estação instalada na fazenda Miranda na região metropolitana de Cuiabá-MT (Coordenadas: 15.73091° S, 56.07086° W).

A AERONET é uma rede global de estações de monitoramento da coluna de aerossóis atmosféricos baseada em instrumentos fotômetros solares automáticos, desenvolvida e mantida pela National Aeronautics and Space Administration (NASA) em parceria com a Laboratoire d'Optique Atmosphérique (LOA) da Universidade de Lille, França, e outros colaboradores internacionais. Ela foi criada com o objetivo de fornecer medidas contínuas, padronizadas e de alta qualidade de propriedades ópticas dos aerossóis atmosféricos, servindo como referência para validação de produtos de sensoriamento remoto por satélite e para estudos de processos físicos, climáticos e ambientais. (NASA AERONET; Holben et al., 1998).

Os fotômetros solares utilizados pela AERONET são sensores que medem a irradiância solar direta e difusa em múltiplos comprimentos de onda. Eles funcionam com base no princípio de que a atmosfera atenua a radiação solar que chega à superfície por meio de espalhamento e absorção causados por partículas aerossóis e moléculas atmosféricas. A partir dessa atenuação, é possível derivar propriedades ópticas dos aerossóis como a Optical Depth (OD), que descreve o grau de extinção da radiação solar por partículas suspensas na coluna atmosférica.

Os instrumentos da rede operam em até preto espectral fixo, abrangendo geralmente as bandas de aproximadamente 340 nm, 380 nm, 440 nm, 500 nm, 675 nm, 870 nm e 1020 nm — faixas de comprimento de onda que permitem caracterizar a distribuição espectral da extinção de luz pelos aerossóis, incluindo dielétricos finos e grosseiros. Sensores modernos da AERONET podem também fornecer dados em uma banda adicional próxima a 1640 nm para aplicações específicas. As medidas são adquiridas automaticamente em campanha contínua com menos intervenção humana, o que confere consistência temporal e comparabilidade espacial entre estações (“Aerosol Robotic Network (AERONET) Homepage”, [s.d.]).

A AERONET oferece uma gama de produtos de alta qualidade que consistem em estimativas da coluna de aerossóis ao longo da trajetória solar. Entre os principais produtos disponíveis destacam-se:

- Aerosol Optical Depth (AOD) em múltiplos comprimentos de onda, que quantifica a extensão da atenuação da luz solar pela coluna atmosférica de aerossóis.

- Angstrom Exponent (α), derivado da dependência espectral da AOD, utilizado como um indicador qualitativo do tamanho médio das partículas aerossóis na coluna atmosférica. Valores maiores de α sugerem predominância de partículas finas, enquanto valores menores estão associados a partículas mais grosseiras.
- Size Distribution de aerossóis, com segmentação em moda fina e moda grossa, permitindo a caracterização dos regimes predominantes de aerossóis sob distintas condições ambientais e emissões.
- Phase Function e Single Scattering Albedo (SSA) em determinadas versões de produtos, que proporcionam informação adicional sobre as propriedades de espalhamento e absorção dos aerossóis, essenciais para estudos radiativos e climáticos.

Os produtos AERONET são disponibilizados em diferentes níveis de qualidade, incluindo Level 1.0 (raw), Level 1.5 (cloud-screened) e Level 2.0 (quality-assured), sendo que os níveis mais elevados passam por procedimentos rigorosos de validação e filtragem de nuvens e ruídos instrumentais, garantindo confiabilidade para aplicações científicas e comparação com dados de sensoriamento remoto. (“Aerosol Robotic Network (AERONET) Homepage”, [s.d.])

A rede AERONET compreende centenas de estações distribuídas globalmente, incluindo locais urbanos, rurais, costeiros e remotos, além de áreas de forte influência de emissões naturais (como desertos e queimadas) e antropogênicas. Essa cobertura espacial diversificada torna a AERONET uma ferramenta essencial para:

- Validação de produtos de satélite, especialmente estimativas de aerosol óptico derivadas de sensores como MODIS embarcados nos satélites Terra e Aqua;
- Estudos climáticos e energéticos, incluindo estimativas de forçante radiativa atribuída aos aerossóis;
- Modelagem atmosférica e química, por meio de comparação e assimilação de perfis e propriedades de aerossóis;
- Monitoramento de eventos de poluição e extremos ambientais, como queimadas, tempestades de poeira e emissões industriais.

Relevância para Este Trabalho

No presente trabalho, os dados da rede AERONET foram utilizados como referência de validação para os produtos de aerosol obtidos via sensoriamento remoto (MODIS Terra + Aqua), fornecendo medidas de Aerosol Optical Depth (AOD) de alta confiança e independentemente instrumentadas em superfície. Além disso, foram utilizadas todas as análises para as duas fontes de dados de AOD, com o objetivo de comparar os resultados.

4.3.3 Estimativa da radiação solar de onda curta

Impulsionada por vários fatores, tais como a popularidade de sistemas de energia fotovoltaica e a necessidade de estudos microclimáticos de evapotranspiração, fotossíntese, etc, diversas técnicas de estimativa da radiação global passaram a ser desenvolvidas. Tais técnicas nascem de diferentes tipos de observação, sejam elas análises empíricas, experimentalistas ou originadas por métodos computacionais e são essenciais para trabalhos onde se necessita do valor de radiação global e não se tem disponibilidade de instrumentos para medição de tal variável.

Uma das técnicas empiristas fortemente disseminadas e aplicadas é a metodologia de Angstrom-Prescott. Ela se iniciou com a modelagem da radiação solar feita por Angstrom em 1924, que propôs a estimativa da radiação global (Q_g) através da radiação no topo da atmosfera em um dia completamente claro (Q_0), considerando pesos e um coeficiente que representasse a insolação (n). Alguns anos depois Prescott fez novos experimentos e propôs algumas alterações na equação de Angstrom, a fim de torna-la aplicável também a dias nublados. Com a alteração proposta, o método ficou conhecido como Angstrom-Prescott, e a radiação global passou a ser calculada com base nos coeficientes linear e angular, não mais nos valores fixos, associados a uma razão de insolação (n/N) e a radiação no topo da atmosfera (Q_0). De acordo com a correção implementada por Prescott, a transmissividade atmosférica (Q_g/Q_0) é linearmente relacionada a razão de insolação (n/N). Assim, o modelo Angstrom-Prescott pode ser implementado através da equação [18]

$$Q_g = (a + b \cdot n/N) \cdot Q_0 \quad [18]$$

Outro método muito aplicado mundialmente é chamado de Bristow-Campbell, que tem por objetivo mostrar que existe uma relação entre a transmissividade atmosférica e a amplitude térmica diária ($T_{max} - T_{min}$) (BRISTOW & CAMPBELL 1984). O modelo proposto captura informações sobre como a parcela do balanço de energia, o calor sensível proporciona a estimativa da energia necessária para aquecimento do ar e a equação proposta pelo modelo pode ser visualizada em [19]

$$Q_g = a[1 - EXP(-b \cdot \Delta T^c)] \cdot Q_0 \quad [19]$$

os coeficientes a , b e c representam as características físicas do local onde está sendo estimada a radiação global e ΔT representa a amplitude térmica medida para a localidade. Sendo assim,

o modelo permite uma estimaco da radiação global através de variáveis que podem ser facilmente medidas, com equipamentos muito simples, o que a torna muito atrativa.

A sua facilidade de implementaco permitiu a sua aplicaco em grande escala, sendo experimentada em localidades dos mais diferentes países. Apesar de ser uma técnica empírica apresenta resultado muito satisfatório quando comparada a outros modelos, por exemplo ao Angstrom-Prescott, e apresenta resultados muito próximos a estimativas dadas por modelos computacionais robustos (SANTOS et al., 2022). O modelo empregado para estimativa da radiação global utilizado no presente trabalho foi o Bristow-Campbell, devido a sua boa aplicabilidade para o Brasil, demonstrando resultados satisfatórios tanto em áreas litorâneas quanto no interior do continente (RAMOS; VIANNA; MARIN, 2018, SANTOS et al., 2022).

Os coeficientes empregados no presente trabalho foram coletados para a regio de Cuiabá-MT e aplicados a equaco, seus valores estão descritos na tabela 2 do Anexo 1.

4.3.4 Dados de energia gerada

Os dados coletados da usina fotovoltaica são fornecidos diretamente pela plataforma de monitoramento do inversor de frequência presente, que  da fabricante SMA Solar Technology. O inversor é um equipamento indispensável nos tipos de sistemas de geração de energia conectados a rede, pois é o responsável pela realização da converso da energia recebida dos módulos em corrente contínua para corrente alternada. Ele é necessário pelo fato de a rede fornecer a energia em corrente alternada que é diferente da energia entregue pelos módulos e para que seja feita a converso é utilizado o inversor de frequência.

Pelo fato de o inversor de frequência realizar essa converso,  nele que são instalados todos os dispositivos de medição de corrente, tensão, potência, energia gerada, e outras informações que a usina entrega. Sendo assim, os fabricantes desenvolveram uma plataforma de monitoramento, onde as informações coletadas pelo inversor podem ser transmitidas. Grande parte dos inversores permitem a conexo com hardwares externos através de cabo de rede, mas os inversores mais modernos possuem conexo com plataformas online de monitoramento, que podem ser conectados a rede de internet através de rede Wifi, e assim podem inserir em armazenamento online as informações que coleta.

No presente trabalho, foi utilizado um inversor que possui a possibilidade de conexo via Wifi e as informações foram coletadas diretamente dessa plataforma, sem a utilização de equipamento externo ao inversor para medição dos dados de geração. O modelo de inversor utilizado na usina em questão é similar ao apresentado na figura 10.



Figura 2 - Modelo de inversor solar presente na usina fotovoltaica, responsável por monitorar a performance do sistema fotovoltaico local. Fonte: <https://www.sma-brasil.com/produtos/inversores-fotovoltaicos/sunny-tripower-x>

Como foi utilizada diretamente a plataforma de monitoramento do próprio fabricante do inversor, foi possível utilizar a variável energia gerada acumulada por dia e com ela foi possível realizar todas as avaliações propostas no presente trabalho. Uma amostra dos dados coletados pode ser visualizados na tabela 3 do anexo 1.

Como é demonstrado na tabela 2, os dados foram coletados para um período de aproximadamente 5 anos completos, iniciando em Julho de 2018 e finalizando em dezembro de 2023. Esse fato é devido a disponibilidade de dados armazenados na plataforma de monitoramento, pois só é possível armazenar o dado de energia gerada caso se possua conexão com a internet via Wifi, se por algum motivo a conexão for perdida, a medida fica ausente para o período em que não houve conexão. Além disso, na localidade onde a usina está instalada não se possuía acesso a internet até a data de 17/07/2018, e após a data de 01/12/2023 a conexão de internet foi interrompida e não se conseguiu mais coletar os dados.

4.4 Metodologia de análise

4.4.1 Preparação dos dados

Após a coleta de todas as variáveis utilizadas neste estudo, iniciou-se a etapa de construção de um banco de dados consolidado, reunindo todas as informações necessárias para a realização das análises. No entanto, como cada variável foi obtida a partir de fontes distintas, com diferentes características de aquisição e possíveis limitações operacionais, observou-se

discrepâncias entre as datas e frequências de coleta dos dados. Dessa forma, tornou-se necessária a realização de uma etapa adicional de preparação e harmonização do banco de dados.

Conforme descrito na Seção 4.4.4, os dados de geração de energia, que constituíram a primeira variável coletada, apresentaram algumas falhas associadas à interrupção da conexão com a internet no sistema de monitoramento da usina. Essas falhas ocasionaram lacunas na série temporal, resultando em diferenças no número de registros disponíveis em relação aos demais conjuntos de dados utilizados no estudo.

Em função dessas inconsistências, foi necessário realizar uma etapa de organização e filtragem dos dados, com o objetivo de garantir a consistência temporal entre todas as variáveis consideradas nas análises subsequentes.

4.4.1.1 Validação dos dados de satélites

O procedimento de validação dos dados de satélite foi realizado após a coleta completa dos dados referentes ao período analisado (17/07/2018 a 01/12/2023). Para isso, foram coletados dados de profundidade óptica de aerossóis (AOD) provenientes do sensor MODIS em duas localizações distintas:

- a localização da estação da rede AERONET situada na Fazenda Miranda, em Cuiabá–MT (15.73091° S; 56.07086° W);
- a localização da usina fotovoltaica analisada, no município de Pontes e Lacerda–MT (15.22807° S; 59.351328° W).

A coleta realizada para a localização da estação AERONET teve como objetivo exclusivo a execução do procedimento de validação dos dados de satélite. Já os dados coletados para a localização da usina fotovoltaica foram posteriormente incorporados ao banco de dados final utilizado nas análises do estudo. Como as medições de AOD provenientes das duas fontes são realizadas em diferentes comprimentos de onda, foi necessário aplicar um procedimento de conversão espectral utilizando a relação apresentada na Equação [8], descrita na Seção 3.1.4.

Dessa forma, os valores de AOD obtidos pela AERONET no comprimento de onda de 500 nm foram convertidos para AOD em 550 nm, permitindo a comparação direta com os dados derivados do sensor MODIS, conforme procedimento amplamente adotado na literatura científica. Além disso, considerando que o produto de satélite utilizado corresponde ao conjunto combinado das observações dos satélites Terra (EOS AM-1 satellite) e Aqua (EOS PM-1 satellite), as medições são realizadas em horários distintos ao longo do dia. Dessa forma, foi

necessário realizar o pareamento temporal entre os dados de satélite e as medições da AERONET correspondentes aos horários de passagem dos dois satélites.

Para garantir uma correspondência temporal adequada entre os conjuntos de dados, foi definida uma janela temporal centrada no horário de passagem do satélite, considerando um intervalo de 30 minutos antes e 30 minutos após esse momento. Como os dados da AERONET apresentam elevada frequência de amostragem — aproximadamente uma medição a cada 15 minutos — essa janela temporal permitiu identificar registros compatíveis entre as duas fontes de dados.

A partir desse pareamento temporal, foram realizados testes estatísticos para avaliar a consistência entre os dados de AOD provenientes do satélite e da estação de superfície. Os resultados desse procedimento são apresentados na Figura 11, que mostra a correlação de Pearson calculada entre os valores de AOD obtidos pelas duas fontes de dados. Além da correlação linear, também foram calculados indicadores estatísticos adicionais, incluindo:

- Erro Médio Absoluto (MAE);
- Erro Quadrático Médio (MSE);
- Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE);
- Coeficiente de determinação (R^2);
- média e desvio padrão de cada conjunto de dados.

Os valores obtidos para esses parâmetros são apresentados na Tabela 4 do Anexo 1. A análise da Figura 11 indica a existência de uma relação positiva entre os valores de AOD obtidos pelas duas fontes, evidenciando que o aumento da AOD medida pela AERONET tende a ser acompanhado por um aumento correspondente nos valores estimados pelo MODIS. Além disso, os resultados apresentados na Tabela 4 indicam que o RMSE obtido foi de aproximadamente 0,13, valor consistente com aqueles reportados em estudos anteriores presentes na literatura (RUDKE et al., 2023).

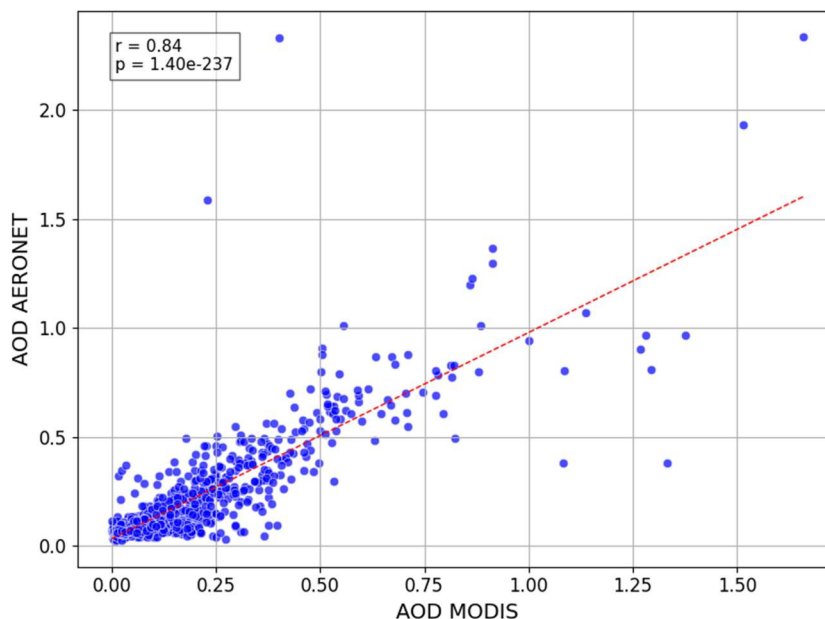


Figura 3 - Correlação entre AOD da AERONET e AOD do sensor MODIS.

Após a realização do procedimento de validação dos dados provenientes do sensor MODIS, foi realizada a preparação do período de análise, com o objetivo de reduzir a influência de possíveis variáveis externas que pudessem interferir nas análises.

Os valores de profundidade óptica de aerossóis (AOD) obtidos pelo MODIS para a localização da usina fotovoltaica podem ser observados na Figura 12. A partir dessa série temporal, é possível identificar um padrão sazonal anual nos valores de AOD. Em função dessa característica, optou-se pela realização de análises segmentadas por intervalos anuais.

Além disso, observa-se que os maiores valores de AOD concentram-se predominantemente entre os meses de maio e outubro, período que corresponde ao inverno na região analisada. Esse intervalo também coincide com a estação seca local, caracterizada pelos menores índices de precipitação ao longo do ano. As condições atmosféricas típicas desse período favorecem o aumento da ocorrência de queimadas naturais e antrópicas, o que contribui

para o aumento da concentração de aerossóis na atmosfera (SOUZA et al., 2013).

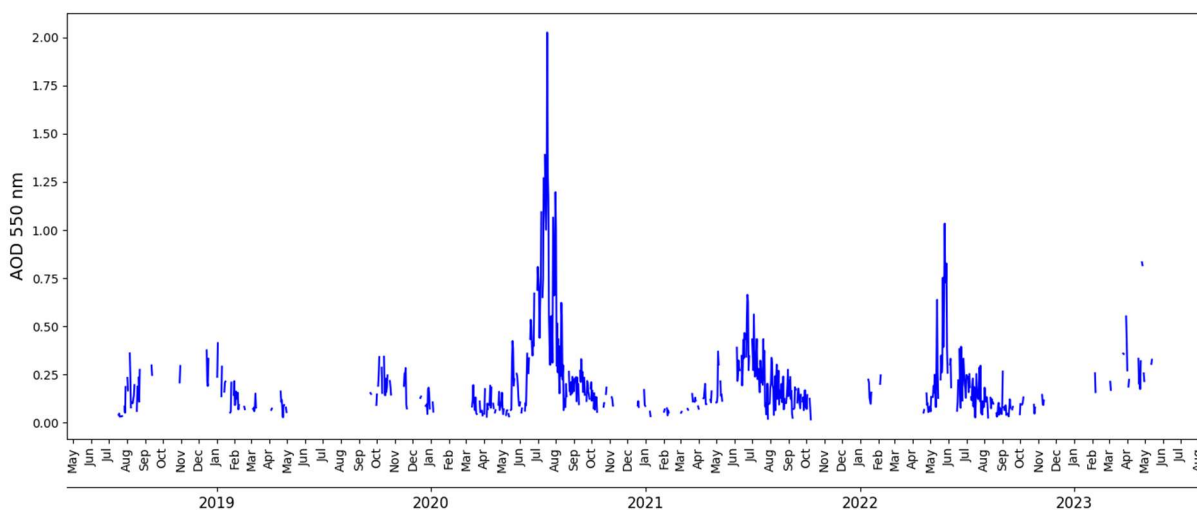


Figura 4 - AOD MODIS Período completo de análise.

Diante desse comportamento sazonal, foi realizada uma filtragem no banco de dados geral, mantendo apenas os registros correspondentes ao período seco, compreendido entre os meses de maio e outubro. Dessa forma, todas as análises subsequentes foram conduzidas considerando apenas esse intervalo temporal. Após a definição do período seco, foi realizada a estimativa da radiação solar global de onda curta utilizando o modelo de George Bristow e Glen Campbell (modelo Bristow–Campbell). Para isso, foi utilizada a amplitude térmica diária, calculada a partir dos dados de temperatura máxima e mínima coletados nas estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), descritas na Seção 4.2.

Os valores estimados de radiação global (RG) foram então incorporados ao banco de dados final, permitindo a aplicação das metodologias de análise adotadas neste estudo. Com os valores de RG estimados para todos os dias do período analisado, foi realizada a divisão da série temporal em intervalos anuais. Para cada intervalo anual, foi determinado um valor de referência de AOD, definido como o menor valor de AOD observado naquele ano.

Para a identificação desses valores, foi desenvolvido um script em linguagem Python responsável por localizar, dentro de cada intervalo anual, o dia correspondente ao menor valor de AOD. Para essa mesma data, foram armazenados também os valores de potência gerada pela usina fotovoltaica e de radiação global estimada. A partir da definição dos valores de referência de potência gerada e radiação global, foram então aplicadas as metodologias de análise PARF, PAFE e I_r . Esses indicadores foram calculados para cada dia do período analisado, e seus valores foram posteriormente incorporados ao banco de dados final.

Adicionalmente, para cada intervalo anual foi realizada uma classificação dos dados em diferentes classes de concentração de aerossóis, com base nos quartis da distribuição de AOD. Dessa forma, foram definidas duas classes principais:

- Baixa concentração de aerossóis: valores de AOD pertencentes ao 1º e 2º quartis da distribuição;
- Alta concentração de aerossóis: valores de AOD pertencentes ao 3º e 4º quartis da distribuição.

Essa classificação permitiu comparar o comportamento da geração de energia fotovoltaica e dos indicadores analisados sob diferentes condições de carga de aerossóis atmosféricos.

4.4.2 Avaliação dos Efeitos dos aerossóis

Como descrito na seção de revisão de literatura a metodologia da Forçante radiativa de Aerossóis na potencia (PARF) permite uma boa representação do efeito dos aerossóis nos sistemas fotovoltaicos, associados ao cálculo da Eficiência do Forçamento Radiativo na Potencia (PAFE), pode levar a uma avaliação precisa de como acontece a influencia. A metodologia descrita por Gómez (J.L. GÓMEZ-AMO et al., 2019) para PARF e PAFE utiliza as equações [13] e [14] para os termos descritos, assim sendo

$$PARF = P(t) - P_0(t) \quad [13]$$

$$PAFE = \frac{P(t) - P_0(t)}{AOD(t) - AOD_0(t)} \quad [14]$$

onde $P(t)$ é a potência gerada pelo sistema em qualquer condição de aerossóis, $P_0(t)$ é a potencia gerada pelo sistema na condição de aerossóis de referência, $AOD(t)$ é a AOD medida e $AOD_0(t)$ é a AOD de referência. Através dessa metodologia é possível verificar até mesmo como diferentes tipos de aerossóis podem afetar a potência gerada pelo sistema, tal como é explicitado no trabalho de Gómez (J.L. GÓMEZ-AMO et al., 2019).

Além disso, foi utilizada a análise da irradiância relativa irradiância relativa, conforme metodologia descrita por Glauber G. Cirino (CIRINO et al., 2014) na seção de revisão de literatura em estudo sobre os efeitos de partículas atmosféricas e nuvens no balanço radiativo de ondas curtas na Amazônia. O método se baseia na comparação entre a irradiância medida na superfície sob qualquer condição de turbidez atmosférica e a irradiância esperada sob condições

atmosféricas de referência, permitindo quantificar a atenuação da radiação associada à presença de material particulado.

A irradiância relativa (I_r) é definida como a razão entre a irradiância medida na superfície (G) e a irradiância de referência (G_{ref}), conforme [9]:

$$I_r = \frac{G}{G_{ref}} \quad [9]$$

onde:

- G representa a irradiância solar medida na superfície (W m^{-2});
- G_{ref} corresponde à irradiância estimada para condições atmosféricas ideais ou de referência (tipicamente céu claro com baixa carga de aerossóis, para situações em que a AOD de 550nm é menor que 0,1).

Essa razão normaliza os valores de irradiância observados, reduzindo a influência do ciclo diurno e da variação sazonal da geometria solar, permitindo isolar o efeito atmosférico e avaliar a sua influência de forma independente. A razão dada pela I_r pode ainda ser multiplicada por 100 para se possuir um valor expresso em porcentagem, caso se tenha interesse.

4.4.3 Análise estatística

A análise estatística dos dados foi conduzida utilizando métodos não paramétricos apropriados para situações em que as suposições de normalidade e homogeneidade de variâncias não são atendidas, visto que os dados foram divididos em subgrupos distintos de acordo com a classe de AOD encontrada na data da medição, conforme descrição da seção 4.5.1. De acordo com a característica dos dados, foram aplicados o teste de Kruskal–Wallis e, após observado efeito global significativo, foram feitas comparações múltiplas post-hoc por meio do teste de Dunn.

O teste de Kruskal–Wallis por postos é uma extensão não paramétrica do teste U de Mann–Whitney, que pode ser aplicado em situações onde se deseja comparar mais de dois grupos independentes, de mesmo tamanho ou tamanho diferentes, com uma variável resposta quantitativa, sendo uma alternativa quando a análise de variância não é atendida, tendo em vista que o teste de Kruskal–Wallis não necessita de comprovação de normalidade e homocedasticidade (GOKHAN CETINKAL et al., 2020).

Esse procedimento substitui os valores originais por suas respectivas classificações obtidos a partir da ordenação combinada de todas as observações e, então, compara as somas

das classificações entre os grupos. A estatística do teste denominada H , segue aproximadamente uma distribuição qui-quadrado sob a hipótese nula H_0 de que todas as populações têm a mesma distribuição, ou seja, no caso do teste de Kruskal-Wallis H_0 é a hipótese de que não existe diferença entre as populações (CORDER; FOREMAN, 2011).

De acordo com essa hipótese, é pressuposto que não nenhuma diferença sistemática entre os grupos, então, se o valor de H for suficientemente grande (valor-p abaixo do nível de significância adotado), é possível se rejeitar a hipótese nula, indicando que pelo menos um dos grupos difere dos demais em relação à posição de suas distribuições centrais. Esse procedimento é robusto à violação de normalidade e é indicado em análises exploratórias e confirmatórias de dados com distribuição desigual entre grupos. A estatística do teste de Kruskal-Wallis pode ser calculada através da equação [7]

$$H = \left[\frac{12}{n(n+1)} \sum_{i=1}^k \frac{R_i^2}{n_i} \right] - 3(n+1) \quad [20]$$

onde R_i é a soma dos postos de tratamento i , n_i é o tamanho da amostra no tratamento i , k é o número de amostras e $n = \sum_{i=1}^k n_i$.

Embora o teste de Kruskal-Wallis seja eficaz para indicar diferenças gerais entre os grupos, ele não identifica exatamente quais pares de grupos apresentam diferenças estatisticamente significativas entre si. Para superar essa limitação e detalhar as comparações por pares, podem ser aplicados testes post-hoc específicos a distribuições não paramétricas. O teste post-hoc de Dunn é um procedimento que permite realizar comparações múltiplas, elaborado para controlar adequadamente o erro do Tipo I em múltiplas comparações após a rejeição da hipótese nula no teste de Kruskal-Wallis. O método de Dunn calcula, para cada par de grupos, uma estatística Z , baseada nas diferenças entre as médias de ranks ajustadas pela variância conjunta para todos os grupos (CORDER; FOREMAN, 2011).

Por meio dessa abordagem, pode-se inferir quais pares de grupos contribuem para a diferença global detectada pelo teste de Kruskal-Wallis, respeitando a estrutura de correlação dos dados ranqueados e a dependência das comparações par a par. Estudos da literatura reforçam a escolha desses métodos para situações em que as premissas paramétricas não são atendidas. Por exemplo, Jeremy et al. aplicaram métodos não paramétricos em seus estudos com grandes conjuntos de dados e visualizaram a utilidade do teste de Kruskal-Wallis para identificar diferenças entre distribuições de dados complexos, mesmo sem pressupor normalidade ou homocedasticidade, realizando posteriormente comparações detalhadas entre grupos com técnicas adequadas de follow-up (JEREMY et al., 2023).

Além disso, em estudos da área da saúde, a utilização de métodos não paramétricos tem sido associada à necessidade de lidar com distribuições assimétricas e outliers, como observado em estudos clínicos, onde variáveis relacionadas a desfechos clínicos foram analisadas considerando pressupostos não paramétricos para garantir inferências válidas sobre diferenças entre grupos (GOKHAN CETINKAL et al., 2020, LUBRANO et al., 2021).

Portanto, a combinação do teste de Kruskal–Wallis com o teste post-hoc de Dunn proporciona uma estrutura analítica rigorosa para a comparação de múltiplas classes independentes em dados que não seguem a distribuição normal, garantindo a validade estatística das inferências e assegurando um controle adequado de erro do Tipo I em múltiplas comparações. Sendo assim, esses dois testes foram utilizados para análise estatística dos resultados do presente trabalho.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Avaliação do produto MAIAC MODIS

A primeira análise foi realizada utilizando o banco de dados contendo os valores de profundidade óptica de aerossóis (AOD) obtidos a partir do sensor MODIS. Uma visualização inicial dos dados é apresentada na Figura 13, que mostra a evolução temporal de duas variáveis: AOD e energia gerada pelo sistema fotovoltaico.

A partir dessa representação gráfica, é possível observar indícios de uma possível relação entre as duas variáveis. Em determinados períodos, valores mais elevados de AOD parecem coincidir com reduções na geração de energia elétrica. De forma semelhante, observa-se que em alguns momentos em que a AOD apresenta valores mais baixos, a geração de energia tende a ser mais elevada.

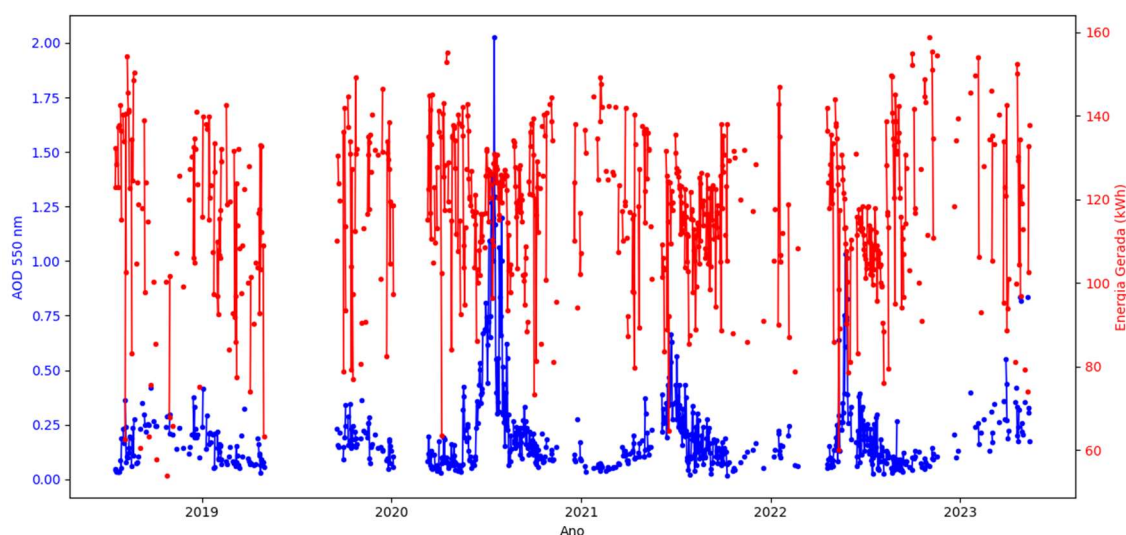


Figura 5 - Gráfico da AOD e da energia gerada para todo o período.

Apesar dessas indicações visuais, a análise gráfica por si só não permite afirmar a existência de uma relação estatisticamente significativa entre as variáveis. Para avaliar quantitativamente essa possível associação, foi calculado o coeficiente de correlação de Karl Pearson entre os valores de AOD e a energia gerada. O coeficiente de correlação obtido foi igual a $-0,22$, indicando uma correlação negativa fraca entre as duas variáveis. Esse valor sugere que, embora exista uma tendência de redução da geração de energia com o aumento da AOD, essa relação é pouco intensa e não apresenta significância estatística suficiente para caracterizar uma dependência linear robusta.

A Figura 14 apresenta o gráfico de dispersão entre as variáveis analisadas. A partir dessa representação, observa-se uma grande dispersão dos dados, o que dificulta a identificação de um padrão claro de relação entre AOD e geração de energia. Dessa forma, os resultados indicam que a avaliação do efeito dos aerossóis atmosféricos sobre a geração de energia fotovoltaica não pode ser adequadamente realizada apenas por meio de análises de correlação simples. Esse resultado reforça a necessidade da utilização de metodologias mais específicas para a avaliação do impacto radiativo dos aerossóis, como o método PARF (Photovoltaic Aerosol Radiative Forcing), conforme proposto por J. L. Gómez-Amo et al. (2019).

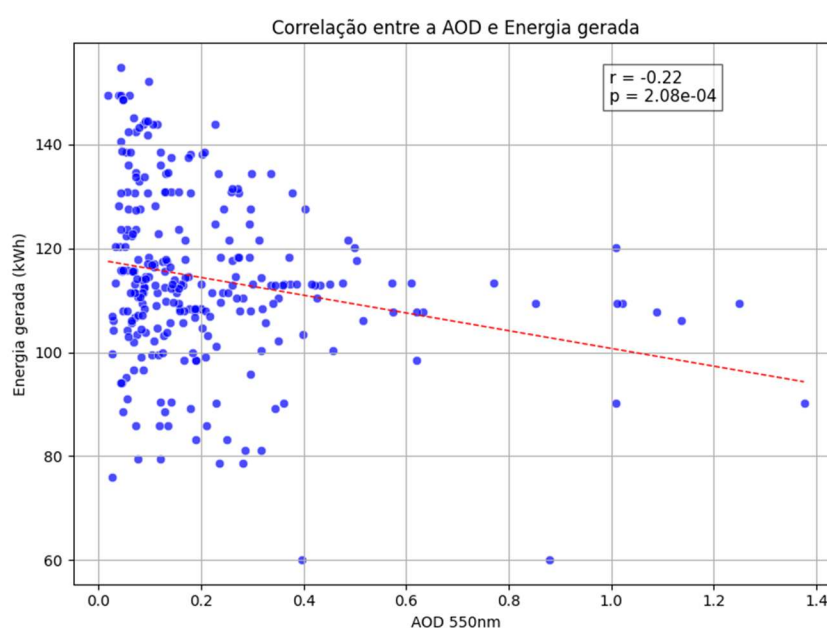


Figura 6 - Correlação entre AOD e energia gerada.

A aplicação da metodologia PARF pode ser observada na Figura 15, que apresenta os gráficos da profundidade óptica de aerossóis (AOD) em 550 nm e da PARF para o sistema fotovoltaico para cada ano do período analisado. A análise desses gráficos evidencia algumas limitações na representação dos resultados, especialmente no caso do ano de 2019, no qual se observa maior fragilidade na interpretação dos valores.

Conforme descrito na Seção 4.5.1, durante o processo de preparação dos dados o banco de dados final que utiliza as medições provenientes do sensor MODIS foi dividido em intervalos anuais. Entretanto, devido às etapas de filtragem e consistência dos dados, alguns anos permaneceram com menor quantidade de registros disponíveis. No caso específico de 2019, por exemplo, restaram apenas 125 dias válidos, de um total inicial de 1.149 registros disponíveis no período analisado.

Entre os intervalos anuais considerados, o ano de 2022 apresentou o maior número de observações válidas, sendo ilustrado na Figura 15d. A análise desse caso evidencia de forma mais consistente o comportamento esperado da metodologia. De modo geral, observa-se que a aplicação da técnica PARF apresenta maior dificuldade em representar adequadamente os efeitos dos aerossóis quando a disponibilidade de dados é limitada. Nessas situações, podem surgir tendências artificiais ou inconsistentes, especialmente em períodos nos quais seria esperado um comportamento distinto das variáveis analisadas.

Um exemplo dessa limitação ocorre no ano de 2019, no qual o período correspondente à estação seca apresenta escassez de dados disponíveis, no intervalo em que normalmente são registrados os maiores valores de AOD na região. Essa ausência de observações reduz a capacidade do método em representar corretamente a variabilidade sazonal da concentração de aerossóis. Outra dificuldade observada é que, em situações com baixa disponibilidade de dados, os valores calculados de PARF podem apresentar resultados positivos. Esse comportamento pode levar à interpretação de que a geração de energia fotovoltaica sob condições atmosféricas com aerossóis seria superior à geração observada em condições de referência (céu limpo), o que contraria o comportamento físico esperado.

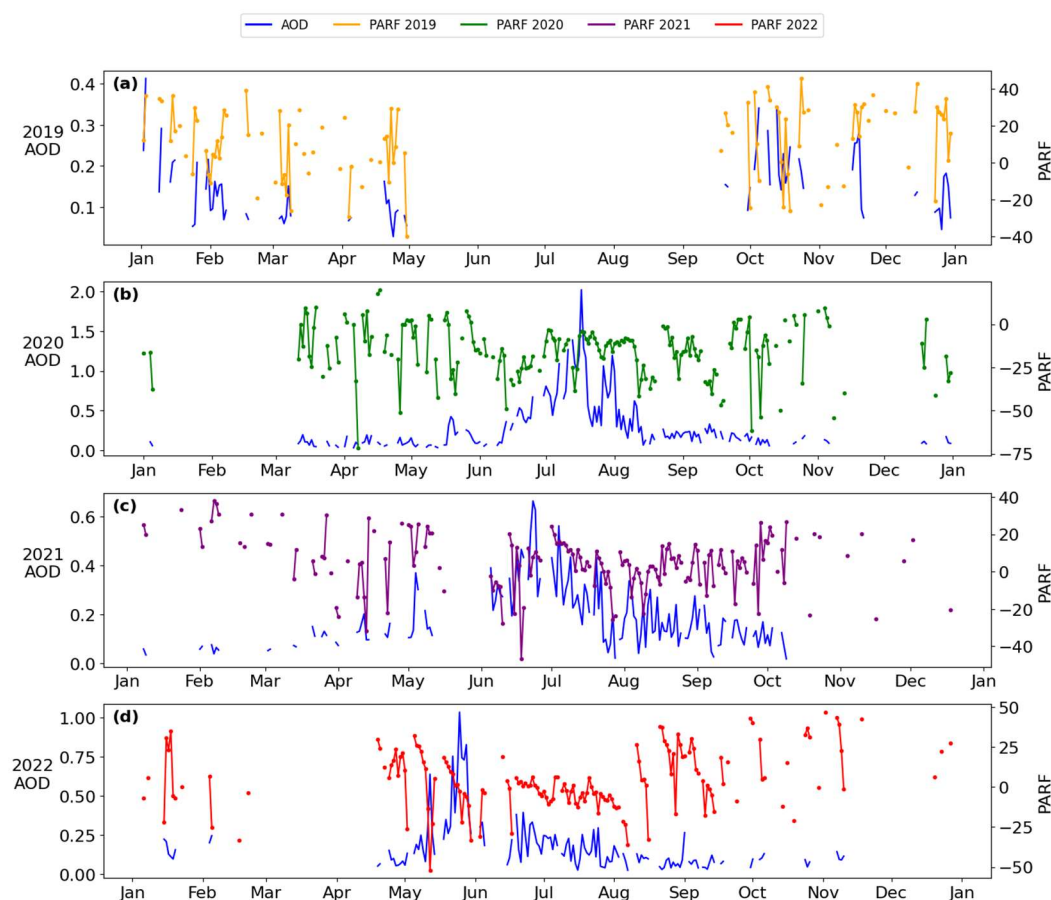


Figura 7 - Gráfico da PARF e AOD de 550nm para todos os anos.

Considerando que o indicador PARF é calculado a partir da diferença entre a energia gerada nas condições atmosféricas observadas e a energia gerada sob condições de referência de céu limpo, espera-se que esta última represente o cenário de máxima disponibilidade de irradiância solar incidente.

Dessa forma, durante períodos caracterizados por valores elevados de AOD — que indicam maior concentração de aerossóis na atmosfera — pressupõe-se a ocorrência de maior atenuação da radiação solar ao longo da coluna atmosférica. Consequentemente, a energia gerada pelo sistema fotovoltaico tende a ser inferior àquela estimada para a condição de referência de céu limpo.

5.2 Avaliação das emissões de queimadas na energia gerada.

Conforme descrito na Seção 4.4, o período seco foi escolhido como intervalo central para a realização das análises. Dessa forma, os anos de **2018, 2019 e 2023** foram removidos do conjunto de dados, uma vez que não apresentavam quantidade suficiente de registros durante a estação de inverno. Assim, foram selecionados apenas os períodos secos correspondentes aos anos **2020, 2021 e 2022**, que são apresentados na Figura 16.

Na Figura 16 observa-se que os valores de PARF apresentam resultados positivos apenas em algumas ocasiões, indicando um comportamento mais consistente com o esperado na literatura (J. L. Gómez-Amo et al., 2019).

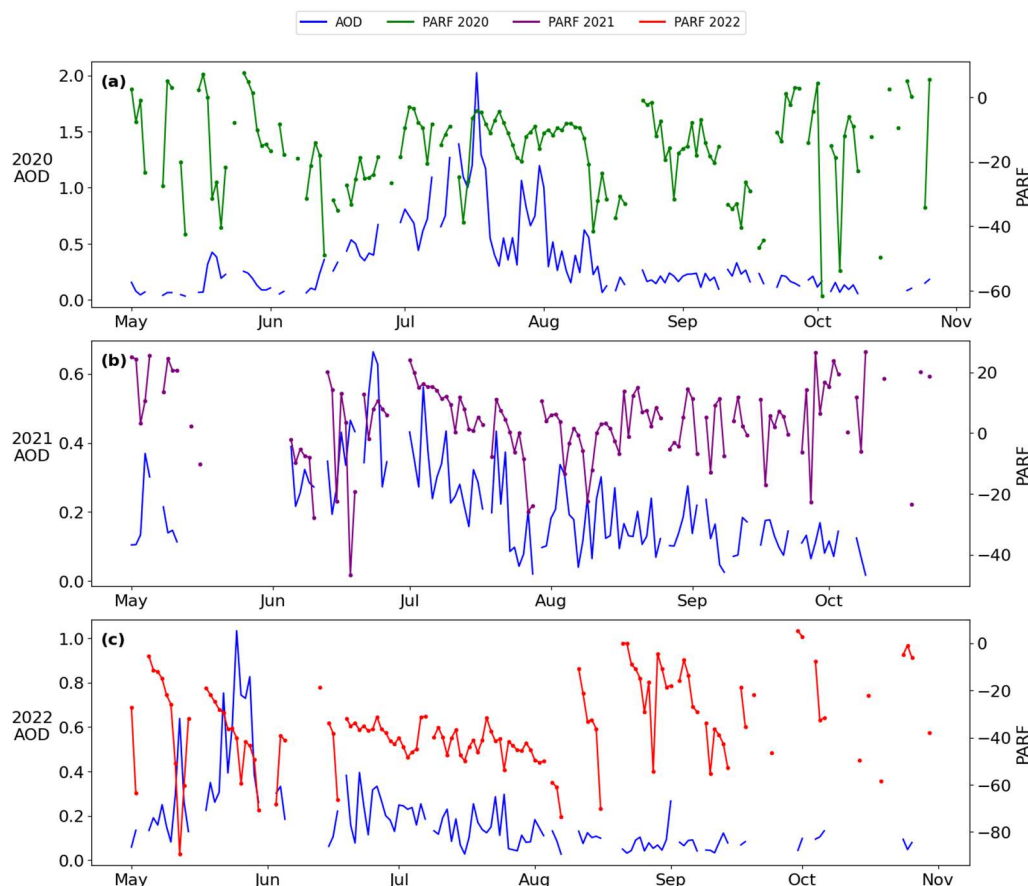


Figura 8 - Gráfico da PARF e AOD de 550nm de 2020 a 2022.

Através da análise da figura 16 é possível se verificar uma grande melhoria na representação dos efeitos. Conforme mencionado anteriormente, espera-se que os valores de PARF sejam negativos, com módulo elevado em condições de presença de aerossóis ou muito próximos de 0 em condições de ausência de aerossóis. Diante disso, na figura 16 é possível visualizar o efeito esperado para os valores de PARF, com maior ênfase para o ano de 2022, que é apresentado na figura 16c.

Na figura 16c é possível visualizar uma relação muito boa entre as duas variáveis, visto que há momentos de aumento de AOD em que ocorre concomitantemente uma diminuição da PARF, por exemplo no momento em que é visualizado o menor valor de PARF no mês de maio, é também o momento em que são visualizados os maiores valores de AOD no período de análise. Com o objetivo de visualizar como a PARF se relaciona com a AOD foi realizada uma separação dos dados em classe de acordo com os valores de AOD medidos, de acordo com a descrição dada na seção 4.5, na figura 17 é demonstrado um gráfico tipo boxplot com as informações estatísticas de cada classe de dado.

Na figura 17 é visto uma grande dispersão nos valores de PARF quando a AOD é baixa para todos os anos, visto o intervalo interquartil está entre 10 e -75kW aproximadamente, para o ano de 2020 por exemplo. Nessa figura, é possível verificar também que para o ano de 2021 os valores da PARF possuíram mediana positiva, mostrando um grande deslocamento dos valores em relação aos outros anos, no entanto, ao se interpretar essa informação em relação aos valores de AOD, é visto que o ano de 2021 possui valores menores de AOD que os outros anos, conforme demonstrado na figura 12.

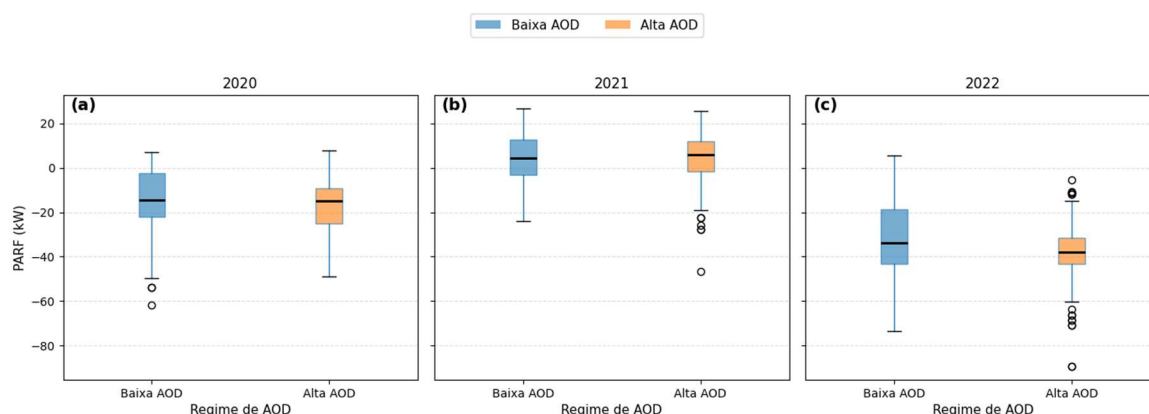


Figura 9 - Boxplot com grandezas estatísticas de cada classe de dado.

Na Figura 17 observa-se uma elevada dispersão dos valores de PARF quando a AOD apresenta valores baixos para todos os anos analisados. No caso do ano de 2020, por exemplo, o intervalo interquartil situa-se aproximadamente entre 10 kW e -75 kW. Observa-se também que, no ano de 2021, a mediana dos valores de PARF apresenta valor positivo, indicando um deslocamento significativo da distribuição em relação aos demais anos. Entretanto, ao comparar esse resultado com os valores de AOD apresentados na Figura 12, verifica-se que o ano de 2021 apresentou, em média, menores concentrações de aerossóis em comparação aos demais anos analisados.

Outro aspecto relevante apresentado na Figura 17c refere-se à mediana dos valores de PARF para o ano de 2022, no qual a classe de AOD alta apresenta maior magnitude entre os três anos analisados. Os valores de média, desvio-padrão e mediana também são apresentados na Tabela 5 do Anexo 1, permitindo uma visualização mais detalhada dessas estatísticas. A análise dessas medianas indica que os períodos com maiores valores de AOD correspondem também aos períodos com maior impacto na geração de energia fotovoltaica.

Apesar disso, não é possível afirmar que não exista atenuação da potência gerada na classe de AOD baixa, uma vez que a mediana da PARF nessa classe apresenta valores relativamente próximos aos observados para a classe de AOD alta. A Figura 17 também

evidencia a presença de outliers nas duas classes analisadas, sendo a classe de AOD baixa aquela que apresenta maior quantidade desses valores extremos. Esses resultados sugerem que os aerossóis exercem influência na geração de energia, porém essa evidência ainda necessita ser confirmada por meio de testes estatísticos mais robustos.

Como os dados foram separados em grupos de acordo com as classes de AOD, tornou-se necessário utilizar um teste estatístico não paramétrico para avaliar as diferenças entre os grupos. O teste escolhido foi o teste de Kruskal–Wallis, uma vez que esse método não exige a condição de homoscedasticidade entre os grupos analisados. A partir da análise dos boxplots apresentados na Figura 17, observa-se que a homoscedasticidade não está presente entre os grupos, justificando a aplicação desse teste. Assim, foi aplicado o teste de Kruskal–Wallis conforme a metodologia descrita na Seção 4.5.3.

A estatística H obtida no teste foi igual a 8,8519, enquanto o p -valor calculado foi 0,002928. Para avaliar a significância desse resultado, o valor de H foi comparado ao valor crítico da distribuição qui-quadrado para o nível de significância adotado no estudo. Considerando $\alpha = 0,05$, o valor crítico da distribuição qui-quadrado é 5,99, valor inferior à estatística H obtida no teste.

Dessa forma, como $H = 8,8519 > 5,99$, conclui-se que existe diferença estatisticamente significativa entre os grupos analisados. Esse resultado também é confirmado pelo p -valor obtido ($p = 0,002928$), que é inferior ao nível de significância adotado. Assim, rejeita-se a hipótese nula do teste de Kruskal–Wallis, que afirma não haver diferenças entre as distribuições dos grupos analisados.

Portanto, os resultados indicam que as classes de PARF associadas a diferentes níveis de AOD apresentam diferenças estatisticamente significativas, indicando que valores mais elevados de AOD estão associados a reduções na energia gerada, caracterizando um forçamento radiativo negativo sobre a geração fotovoltaica. Para complementar essa análise, foi aplicado o teste post-hoc de Dunn, que permite realizar comparações pareadas entre as classes analisadas. A matriz de comparação obtida nesse procedimento é apresentada na Tabela 6 do Anexo 1.

A análise dessa tabela confirma a existência de diferença estatisticamente significativa entre as classes de AOD baixa e alta, reforçando a evidência de que a presença de aerossóis exerce influência na geração de energia. Na Figura 18 é apresentada a dispersão dos valores de PARF para cada classe de AOD nos três anos analisados.

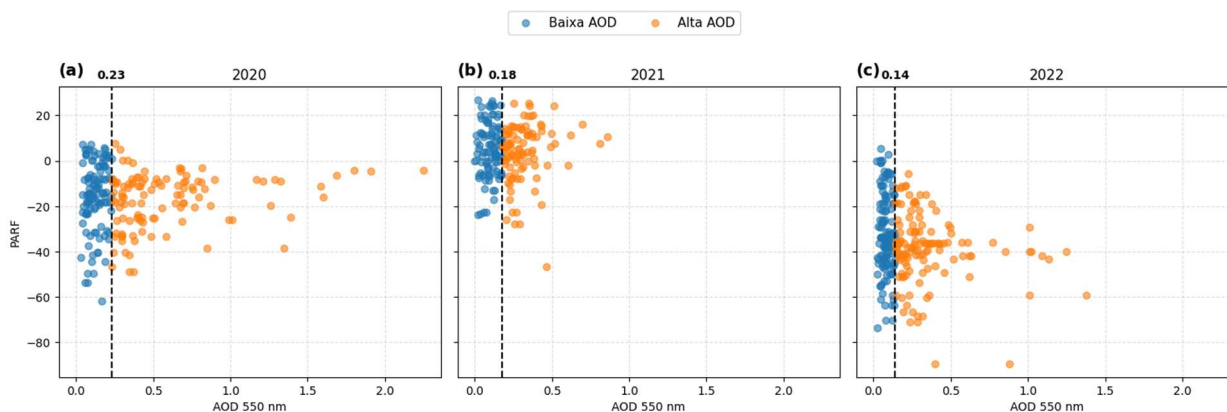


Figura 10 - Dispersão dos valores de cada classe de AOD.

Observa-se que a classe de AOD baixa apresenta maior dispersão dos valores de PARF, com valores variando aproximadamente entre 10 kW positivos e -60 a -80 kW para os anos de 2020 e 2022. Esse comportamento sugere que, em condições de baixa concentração de aerossóis, outros fatores além da presença de aerossóis podem influenciar a geração de energia fotovoltaica. Por outro lado, a classe de AOD alta apresenta menor dispersão dos valores, com maior concentração entre aproximadamente -10 kW e -60 kW, especialmente no ano de 2022.

Outro aspecto importante observado na Figura 18 refere-se ao limite que separa as duas classes de AOD, que nos anos de 2021 e 2022 apresenta valor próximo de 0,1. Esse resultado está em concordância com valores relatados na literatura como limite aproximado para condições de céu limpo (Cirino et al., 2014). Esse valor pode indicar um possível limiar atmosférico, no qual valores de AOD inferiores a esse limite apresentam influência reduzida dos aerossóis sobre a geração de energia, enquanto valores superiores indicam condições em que os aerossóis passam a exercer impacto mais significativo.

Além da análise baseada na PARF, também foi aplicada a análise da irradiância relativa (I.R.), variável que representa a razão entre a radiação de onda curta recebida na superfície e a radiação de referência. Com o objetivo de avaliar a relação entre a irradiância relativa e a concentração de aerossóis, foi calculada a correlação de Pearson entre a AOD e a I.R., cujo resultado é apresentado na Figura 19.

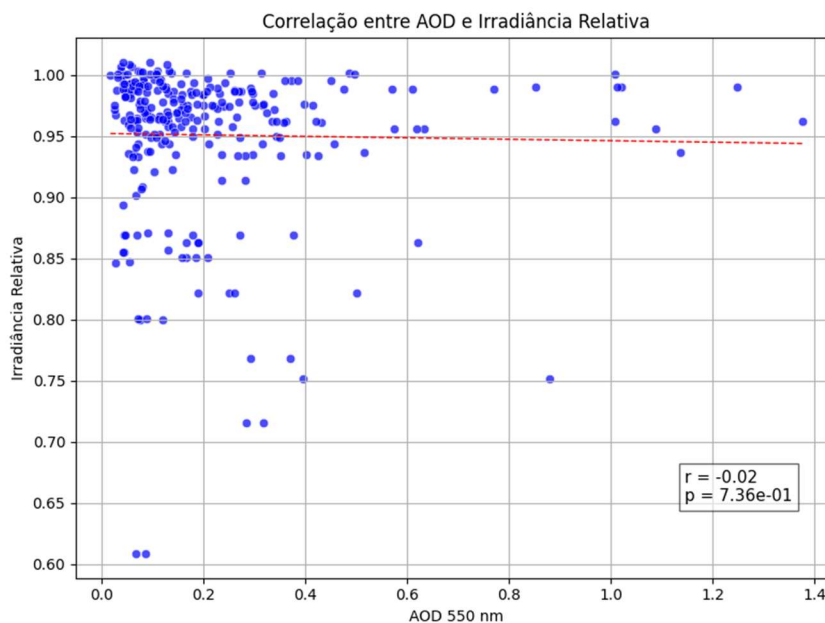


Figura 11 - Correlação entre AOD e Irradiância Relativa.

O coeficiente de correlação obtido foi $r = -0,02$, indicando uma correlação linear muito fraca entre as variáveis. Entretanto, o p-valor calculado indica que existe uma associação estatisticamente significativa entre elas. Assim, pode-se afirmar que o aumento da AOD tende a estar associado a uma redução da irradiância relativa, comportamento indicado pelo sinal negativo da correlação e pela inclinação da reta de tendência apresentada na Figura 19.

A aplicação do método da irradiância relativa também pode ser observada na Figura 20, que apresenta a relação entre os valores de energia gerada e os valores calculados de I.R., conforme metodologia descrita na Seção 4.5.2.

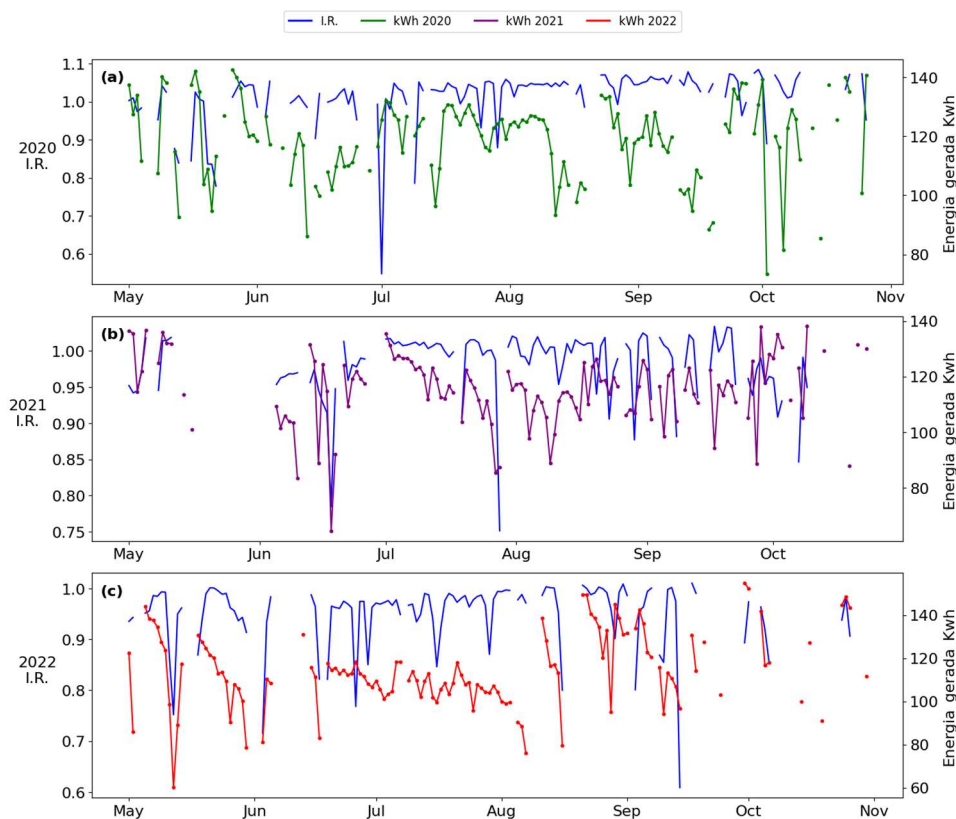


Figura 12 - Gráfico entre energia gerada e irradiância relativa. Fonte: o autor.

O comportamento observado na figura 20 aponta uma grande relação entre as duas medidas, com o objetivo de comprovar essa afirmação foi então calculado o valor da correlação de Pearson para as duas variáveis. As informações sobre a correlação entre as variáveis podem ser visualizadas na figura 21, onde existe um grande alinhamento dos dados a reta de tendência apesar de os pontos apresentarem uma grande dispersão. O coeficiente de correlação calculado foi igual a 0,11, 0,22 e 0,33, para os anos 2020, 2021 e 2022, respectivamente, representando um bom relacionamento entre os 2 parâmetros analisados, o que pode ser comprovado através do valor p calculado. Apesar de uma correlação fraca, é visto que para os valores mais próximos de 1 de irradiância relativa são os momentos em que a energia gerada tende a ter valores mais altos.

Esse aspecto é completamente coerente, pois os momentos em que a irradiância relativa possui valores mais altos são os momentos em que a radiação global é mais próxima da radiação de referência, que é coletada para um dia de céu limpo. Dessa forma, ao calcular a razão entre os dois valores se encontra uma relação com valores próximos a 1, demonstrando que naquele momento a radiação recebida na superfície será maior, sendo assim a energia gerada tende a ser maior.

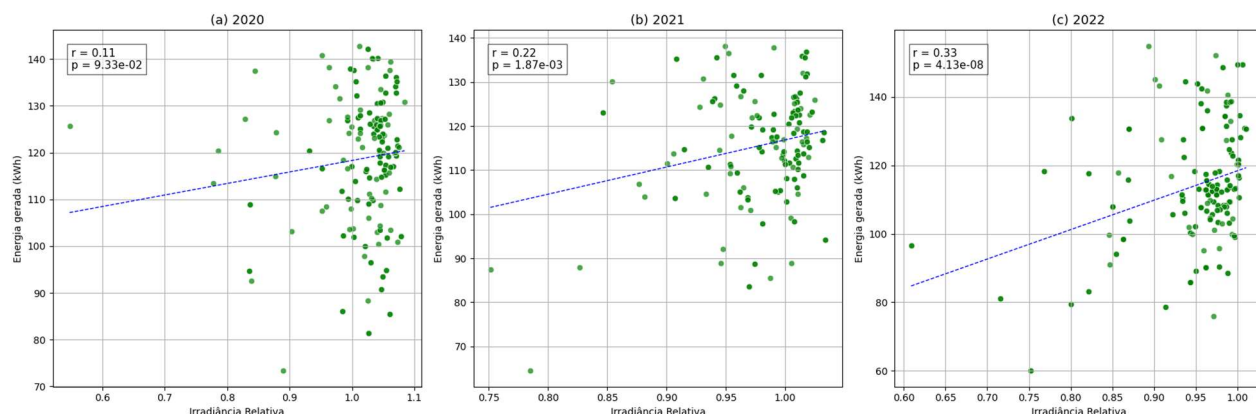


Figura 13 - Correlação entre Irradiância relativa e Energia gerada.

Os coeficientes de correlação obtidos foram 0,11, 0,22 e 0,33 para os anos de 2020, 2021 e 2022, respectivamente. Esses valores indicam uma correlação positiva fraca, porém estatisticamente significativa entre as variáveis. Observa-se que valores de irradiância relativa próximos de 1 correspondem, em geral, aos momentos em que a energia gerada apresenta valores mais elevados.

Esse comportamento é esperado, uma vez que valores de I.R. próximos de 1 indicam condições em que a radiação global observada se aproxima da radiação de referência correspondente a céu limpo, resultando em maior disponibilidade de energia solar para conversão fotovoltaica. Essa relação pode ser observada de forma mais clara na Figura 22.

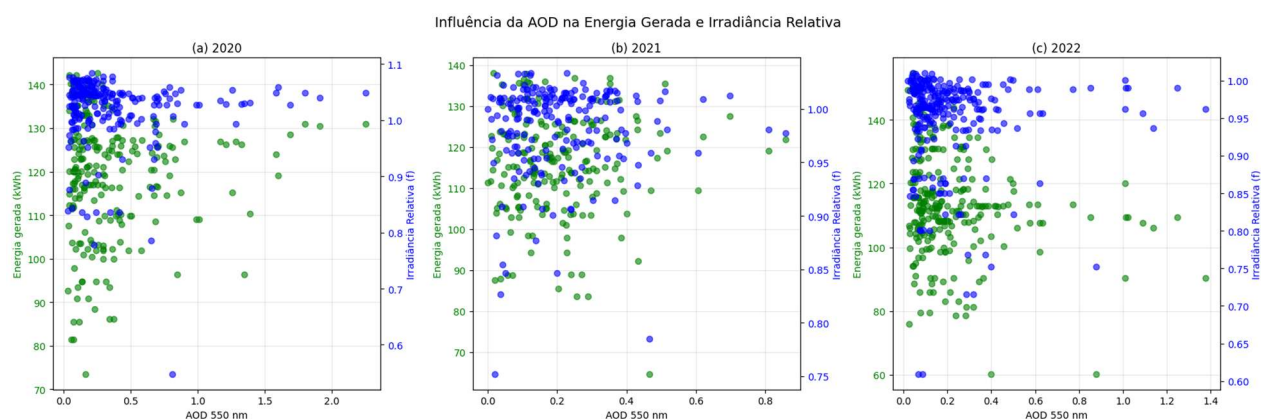


Figura 14 – Relação entre Energia gerada, Irradiância relativa e AOD. Fonte: o autor.

Nessa figura observa-se que os valores de irradiância relativa mais próximos de 1 ocorrem predominantemente em condições de menor AOD, correspondendo a atmosferas mais limpas. Consequentemente, nesses mesmos intervalos observa-se maior concentração de valores elevados de energia gerada.

Por fim, também foi avaliada a correlação direta entre AOD e energia gerada. O coeficiente de correlação de Pearson obtido foi $-0,26$, indicando uma relação negativa entre as variáveis. A dispersão desses dados é apresentada na Figura 23. Apesar da elevada dispersão dos pontos, observa-se uma tendência geral de redução da energia gerada à medida que a AOD aumenta, comportamento que pode ser observado tanto na regressão linear quanto em ajustes polinomiais.

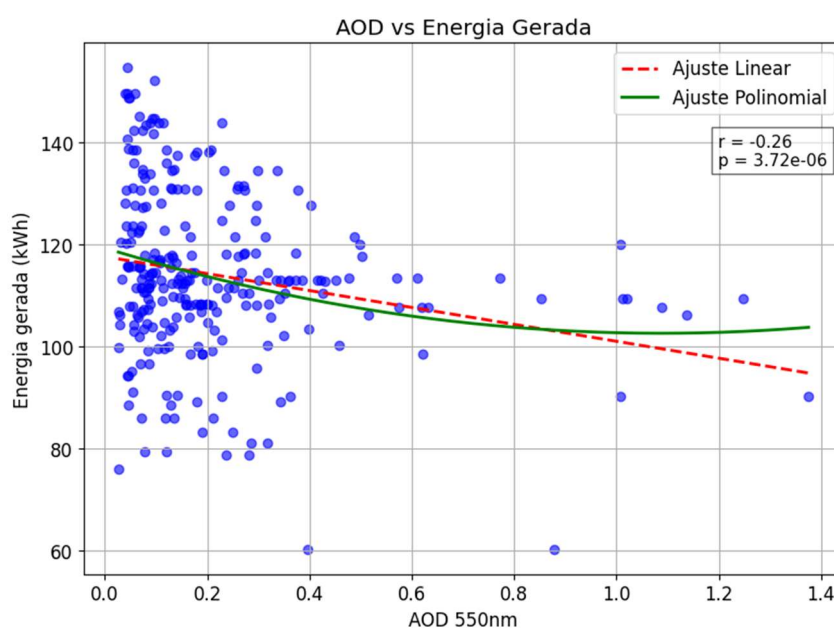


Figura 15 - Correlação entre AOD 500nm e energia gerada.

Portanto, os resultados obtidos no presente trabalho evidenciam a existência de uma influência mensurável dos aerossóis atmosféricos sobre a geração de energia fotovoltaica. Entretanto, essa relação não se manifesta de forma direta, linear ou estatisticamente evidente quando analisada por meio de abordagens simplificadas. Conforme observado na Figura 13, a análise visual conjunta entre a profundidade óptica de aerossóis (AOD) e a energia gerada sugere que períodos caracterizados por maior carga de material particulado na atmosfera tendem a estar associados à redução na energia produzida. Contudo, tal comportamento não pode ser confirmado de maneira imediata, uma vez que a elevada variabilidade dos dados pode refletir a atuação simultânea de diversos processos atmosféricos que também influenciam a disponibilidade de radiação solar na superfície.

Essa dificuldade torna-se ainda mais evidente quando se aplica testes de correlação entre AOD proveniente do sensor MODIS e a energia gerada (Figura 12), onde obtém-se um coeficiente de correlação de $-0,26$, conforme pode ser visualizado na Figura 23. Embora o

resultado indique uma tendência negativa entre as variáveis, os baixos valores de correlação sugerem que a relação entre a presença de aerossóis e a geração fotovoltaica não pode ser adequadamente descrita por abordagens univariadas lineares. Esse comportamento está de acordo com estudos que demonstram que os impactos radiativos dos aerossóis sobre sistemas fotovoltaicos tendem a ocorrer por meio de processos não lineares e dependentes do estado atmosférico, incluindo interações com vapor d'água e cobertura de nuvens (GÓMEZ-AMO et al., 2019).

Nesse contexto, a aplicação de metodologias baseadas em forçamento radiativo atmosférico mostrou-se mais apropriada para a avaliação do fenômeno. A separação dos dados em classes de AOD (baixa e alta), conforme descrito na Seção 4.5.1 e ilustrado na Figura 17, permitiu identificar diferenças substanciais no comportamento da variável PARF entre os diferentes regimes atmosféricos. A presença de valores extremos (outliers) nas duas classes, particularmente na classe de baixa AOD, indica que mesmo em condições caracterizadas por menor carga de aerossóis ainda podem ocorrer reduções na energia gerada, possivelmente associadas à influência de outros fatores atmosféricos.

A divisão dos dados em classes também possibilitou a aplicação de testes estatísticos de comparação entre grupos. O teste não paramétrico de Kruskal-Wallis resultou em uma estatística $H = 8,8519$ e $p\text{-valor} = 0,002928$, permitindo rejeitar a hipótese nula de igualdade entre as distribuições das amostras. Esse resultado, associado à análise post-hoc de Dunn, cujos resultados são apresentados na Tabela 6 do anexo 1, reforça a existência de diferenças estatisticamente significativas entre as classes analisadas, evidenciando que os maiores impactos na geração de energia ocorrem em condições caracterizadas por valores elevados de AOD.

Esse comportamento é consistente com o que é descrito na literatura, uma vez que os aerossóis podem atuar simultaneamente por meio de mecanismos de efeito direto — relacionados à dispersão e absorção da radiação solar — e efeito indireto, associado à modificação das propriedades microfísicas das nuvens, alterando sua refletividade e persistência (HAYWOOD; BOUCHER, 2000). Tais processos contribuem para a redução do fluxo radiativo incidente na superfície, impactando diretamente a disponibilidade de energia para sistemas fotovoltaicos, o que é compatível com a diminuição da radiação global estimada em períodos de maior AOD observada neste estudo.

Adicionalmente, a utilização de dados provenientes de duas fontes independentes de AOD, permitiu avaliar a consistência das tendências observadas entre medições obtidas por sensoriamento remoto via satélite (sensor MODIS) e observações realizadas em superfície pela

rede AERONET. Do ponto de vista empírico, os padrões identificados neste estudo apresentam similaridade com aqueles reportados por Del Hoyo et al. (DEL HOYO et al., 2023), que observaram reduções médias anuais entre 8% e 15% na produção fotovoltaica associadas à poluição atmosférica urbana.

No presente trabalho, entretanto, os valores observados indicam impactos potencialmente mais intensos. Conforme apresentado na Tabela 5 do anexo 1, observa-se uma perda média aproximada de 39 kWh na energia gerada em condições caracterizadas por AOD elevada, o que representa uma redução em torno de 35% em relação ao valor médio de energia gerada observado para essa faixa de AOD, conforme ilustrado na Tabela 7 do anexo 1. Além de ficar evidente esse percentual de redução, a Tabela 7 também deixa evidente que o valor médio de energia gerada para a classe de AOD alta é menor que o valor médio para a classe de AOD baixa nos 3 anos, o que reforça os resultados obtidos anteriormente.

Contudo, a magnitude dos impactos observados deve ser analisada considerando-se também a composição dos aerossóis presentes na coluna atmosférica. Aerossóis absorventes, como aqueles provenientes da queima de biomassa, tendem a intensificar os efeitos de atenuação radiativa, amplificando a redução da radiação solar incidente na superfície. Esse fator pode contribuir para explicar a ocorrência de reduções significativas na geração de energia mesmo em condições de baixa AOD, conforme discutido por Herman-Czezuch et al. (2022).

Dessa forma, embora os resultados obtidos no presente estudo corroborem a literatura ao indicar que o aumento da carga de aerossóis atmosféricos está associado à redução da energia fotovoltaica gerada, a análise realizada evidencia que essa relação é mediada por múltiplos processos atmosféricos e metodológicos. Nesse sentido, a modelagem matemática dos parâmetros analisados exige a utilização de abordagens capazes de integrar um conjunto mais amplo de variáveis atmosféricas (DE CAMPOS et al., 2025). A integração entre diferentes fontes de dados e as abordagens estatísticas empregadas neste estudo contribuem para reduzir parte dessas incertezas, ao mesmo tempo em que reforçam a importância de considerar explicitamente os efeitos dos aerossóis em avaliações do desempenho de sistemas fotovoltaicos em escala regional.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos no presente trabalho evidenciam que a presença de aerossóis atmosféricos exerce influência direta sobre a disponibilidade de radiação solar incidente e, consequentemente, sobre a eficiência operacional de sistemas fotovoltaicos instalados em superfície. A análise integrada entre dados reais de geração energética, variáveis meteorológicas e estimativas de profundidade óptica de aerossóis provenientes de sensoriamento remoto e medições em solo permitiu identificar uma relação consistente entre o aumento da carga de partículas atmosféricas e a redução da potência gerada pelo sistema fotovoltaico analisado, mostrando que a redução pode chegar a até 99kWh em alguns casos, conforme ilustrado pela figura 17.

No contexto climático do sudoeste do estado de Mato Grosso, marcado por períodos sazonais de estiagem e elevada incidência de queimadas, a variabilidade da concentração de aerossóis mostrou-se um fator relevante na modulação do desempenho energético do sistema. A aplicação das metodologias PARF e irradiância relativa possibilitou quantificar esse impacto sob diferentes regimes atmosféricos, indicando que valores de AOD acima de 0,14 pode levar a uma redução média de 39kWh, que representa uma perda média de aproximadamente 35% em relação ao valor médio de energia gerada para esses valores de AOD, podendo chegar até a 99kWh.

Adicionalmente, a validação dos dados AOD obtidas por meio do sensor MODIS através de medições em solo da rede AERONET evidenciou que esta é uma ferramenta eficaz para contornar a pouca disponibilidade de estações locais. Portanto, reforça a importância da utilização de bases observacionais complementares para validação de produtos atmosféricos em estudos aplicados ao setor energético.

Dessa forma, conclui-se que a integração entre monitoramento atmosférico e modelagem energética constitui uma abordagem fundamental para o aprimoramento de estimativas de geração fotovoltaica em regiões sujeitas à grande emissão de material particulado. Os achados deste trabalho contribuem para o avanço da compreensão dos efeitos radiativos dos aerossóis em sistemas de geração fotovoltaica conectados a rede, bem como indica caminhos para a modelagem da energia gerada em cenários de variabilidade climática e ambiental.

REFERÊNCIAS

- ANDREAE, M. O.; ROSENFELD, D. Aerosol–cloud–precipitation interactions. *Earth-Science Reviews*, v. 89, p. 13–41, 2008.
- APARECIDA, M. et al. Teores de As, Pb, Cd e Hg e fertilidade de solos da região do Vale do Alto Guaporé, sudoeste do estado de Mato Grosso. *Acta Amazonica*, v. 39, n. 1, p. 61–69, 1 mar. 2009.
- ASADOV, H. H.; ALIEVA, A. J.; ASHRAFOV, M. G. Investigation of possibility of measuring the albedo of Earth’s surface in visible and near infrared bands in conditions of aerosol pollution of atmosphere using unmanned aerial vehicles. *Visnyk NTUU KPI Serii - Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia*, v. 96, p. 28–31, 2024.
- BOHREN, C. F.; HUFFMAN, D. R. *Absorption and scattering of light by small particles*. New York: Wiley, 1983.
- BARRON-GAFFORD, G. A. et al. Agrivoltaics provide mutual benefits across the food–energy–water nexus in drylands. *Nature Sustainability*, v. 2, n. 9, p. 848–855, 2019.
- BOND, T. C. et al. Bounding the role of black carbon in the climate system. *Journal of Geophysical Research*, v. 118, p. 5380–5552, 2013.
- BRISTOW, K. L.; CAMPBELL, G. S. On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 31, p. 159–166, 1984.
- BURG, B. R. et al. Effects of radiative forcing of building integrated photovoltaic systems in different urban climates. *Solar Energy*, v. 147, p. 399–405, 2017.
- CHAKRABORTY, T.; LEE, X. Large differences in diffuse solar radiation among current-generation reanalysis and satellite-derived products. *Journal of Climate*, v. 34, p. 1–52, 2021.
- CHANG KI KIM et al. Comprehensive analysis of spectral mismatch factor for solar cells based on in situ observation of aerosol optical depth spectra and solar spectral irradiance in Korea. *International Journal of Energy Research*, 2023.
- CHEN, Q.-X. et al. Inferring fine-mode and coarse-mode aerosol complex refractive indices from AERONET inversion products over China. *Atmosphere*, v. 10, 2019.
- CHEN, Y. et al. Assessment of solar energy potential in China using an ensemble of photovoltaic power models. *Science of the Total Environment*, v. 877, 2023.

- CHEN, Y.-C. et al. Satellite-based estimate of global aerosol–cloud radiative forcing by marine warm clouds. *Nature Geoscience*, v. 7, p. 643–646, 2014.
- CIRINO, G. G. et al. The effect of atmospheric aerosol particles and clouds on net ecosystem exchange in the Amazon. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 14, p. 6523–6543, 2014.
- CORDER, G. W.; FOREMAN, D. I. *Nonparametric statistics for non-statisticians*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011.
- DE CAMPOS, B. N. et al. Photovoltaic energy modeling using machine learning applied to meteorological variables. *Sustainability*, v. 17, 2025.
- DEBONO, A. et al. Synergistic effect between molybdenum back contact and CIGS absorber in the degradation of solar cells. *Progress in Photovoltaics Research and Applications*, v. 32, p. 137–155, 2023.
- DENG, X. et al. Effect of atmospheric aerosol on surface ozone variation over the Pearl River Delta region. *Science China Earth Sciences*, v. 54, p. 744–752, 2011.
- DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. *Solar engineering of thermal processes*. 4. ed. Hoboken: Wiley, 2013.
- EMBRAPA. 2019. Desempenho de clones de seringueira no sudoeste do estado de Mato Grosso. Brasília: Embrapa.
- GÓMEZ-AMO, J. L. et al. Impact of aerosols on the performance of photovoltaic systems. *Solar Energy*, v. 187, p. 501–513, 2019.
- GÓMEZ-AMO, J. L. et al. Empirical estimates of the radiative impact of an unusually extreme dust and wildfire episode on the performance of a photovoltaic plant in Western Mediterranean. *Applied Energy*, v. 235, p. 1226–1234, 2019.
- GREEN, M. A. *Third generation photovoltaics*. Berlin: Springer, 2003.
- GUEYMARD, C. A. The SMARTS spectral irradiance model after 25 years. *Solar Energy*, v. 187, p. 233–253, 2019.
- GUEYMARD, C. A.; MYERS, D.; EMERY, K. Proposed reference irradiance spectra for solar energy systems testing. *Solar Energy*, v. 73, p. 443–467, 2002.
- HAYWOOD, J.; BOUCHER, O. Estimates of the direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosols: A review. *Reviews of Geophysics*, v. 38, p. 513–543, 2000.

HERMAN-CZEZUCH, A. et al. Impact of aerosols on photovoltaic energy production using a spectrally resolved model chain. *Renewable Energy*, v. 194, p. 321–333, 2022.

HINDS, W. C. *Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles*. New York: Wiley, 2008.

HOLBEN, B. N. et al. AERONET – A federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Remote Sensing of Environment*, v. 66, p. 1–16, 1998.

HOYO, M. D.; RONDANELLI, R.; ESCOBAR, R. Significant decrease of photovoltaic power production by aerosols. *Renewable Energy*, v. 148, p. 1137–1149, 2019.

IPCC. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

JADHAV, A. V. et al. Spatiotemporal assessment of surface solar dimming in India. *Climate*, v. 12, 2024.

JEREMY et al. Empirical investigations into Kruskal-Wallis power studies. *Scientific Reports*, v. 13, 2023.

JOSE, S.; NAIR, V. S.; BABU, S. S. Anthropogenic emissions from South Asia reverses the aerosol indirect effect over the northern Indian Ocean. *Scientific Reports*, v. 10, 2020.

Kambezidis, B.E. Psiloglou, Karagiannis D, et al (2016) Recent improvements of the Meteorological Radiation Model for solar irradiance estimates under all-sky conditions. *Renewable Energy* 93:142–158.

KAUFMAN, Y. J.; TANRÉ, D.; BOUCHER, O. A satellite view of aerosols in the climate system. *Nature*, v. 419, p. 215–223, 2002.

KASKAOUTIS, D. G. et al. Dependence of the spectral diffuse-direct irradiance ratio on aerosol spectral distribution. *Atmospheric Research*, v. 178–179, p. 84–94, 2016.

KUZNETSOV, P. et al. Parametric optimization of combined wind-solar energy power plants. *Applied Sciences*, v. 11, 2021.

LI, X. et al. Impact of aerosols on solar photovoltaic energy production. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 17, p. 9887–9902, 2017.

LIOU, K. N. *An introduction to atmospheric radiation*. 2. ed. San Diego: Academic Press, 2002.

- LIU, B. Y. H.; JORDAN, R. C. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Solar Energy*, v. 4, p. 1–19, 1960.
- LYAPUSTIN, A. et al. Multi-angle implementation of atmospheric correction (MAIAC). *Journal of Geophysical Research*, v. 116, 2011.
- MATEER, C. L.; DELUISI, J. A new Umkehr inversion algorithm. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, v. 54, p. 537–556, 1992.
- MEI, F. et al. Comparison of aircraft measurements during GoAmazon2014/5 and ACRIDICON-CHUVA. *Atmospheric Measurement Techniques*, v. 13, p. 661–684, 2020.
- MIKHALEV, A. V.; TASHCHILIN, M. A.; SAKERIN, S. M. Effect of atmospheric aerosol on ground-based airglow observations. *Atmospheric and Oceanic Optics*, v. 32, p. 410–415, 2019.
- NOFUENTES, G. et al. Is the average photon energy a unique characteristic of the spectral distribution of global irradiance? *Solar Energy*, v. 149, p. 32–43, 2017.
- NOURI, B. et al. A hybrid solar irradiance nowcasting approach. *Solar RRL*, v. 6, 2021.
- OLIVEIRA, P. H. F. et al. The effects of biomass burning aerosols and clouds on the CO₂ flux in Amazonia. *Tellus B*, v. 59, p. 338–349, 2007.
- PAGE, M. J. et al. The PRISMA 2020 statement. *British Medical Journal*, v. 372, 2021.
- PALÁCIOS, R. S. et al. Estimativa da forçante radiativa direta de aerossóis sobre a superfície utilizando dados da rede AERONET. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 29, p. 81–90, 2014.
- PROCÓPIO, A. S. et al. Aerosol optical depth over the Amazon Basin during the biomass burning season. *Journal of Geophysical Research*, v. 109, 2004.
- RAMANATHAN, V. et al. Aerosols, climate, and the hydrological cycle. *Science*, v. 294, p. 2119–2124, 2001.
- RAMOS, J. P. A.; VIANNA, M. D. S.; MARIN, F. R. Estimativa da radiação solar global baseada na amplitude térmica para o Brasil. *Agrometeoros*, v. 26, 2018.
- RATNAPARKHI, A. et al. Is hydrophobic coating on glass equally efficient in reducing soiling loss of solar PVs in clean and polluted environments? *Solar Energy*, v. 265, 2023.
- REM ER, L. A. et al. The MODIS aerosol algorithm, products, and validation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 62, p. 947–973, 2005.

- RUDKE, A. P. et al. Evaluation and comparison of MODIS aerosol optical depth retrieval algorithms over Brazil. *Atmospheric Environment*, v. 314, 2023.
- SANTOS, L. DA C. et al. Calibration and evaluation of estimation models of global solar radiation for the state of Goiás, Brazil. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, v. 16, p. 138–152, 2 dez. 2022.
- SONG, Z.; LIU, J.; YANG, H. Air pollution and soiling implications for solar photovoltaic power generation. *Applied Energy*, v. 298, 2021.
- SOUZA, A. P. et al. Classificação climática e balanço hídrico climatológico no estado de mato grosso. *Nativa*, v. 1, n. 1, p. 34–43, 15 nov. 2013.
- VERVLOESEM, J.; MARCHEGGIANI, E.; CHOUDHURY, M. A. M.; MUYS, B. Effects of photovoltaic solar farms on microclimate and vegetation diversity. *Sustainability*, v. 14, n. 12, 7493, 2022.
- WILD, M. Global dimming and brightening. *Journal of Geophysical Research*, v. 114, 2009.
- YUAN, X. et al. Study on accuracy evaluation of MODIS AOD products and spatio-temporal distribution characteristics of AOD in Hangzhou. *Sustainability*, v. 15, 2023.
- ZANGESKI NOVAIS, J. W. et al. Relação entre profundidade óptica de aerossóis e radiação fotossinteticamente ativa e global no cerrado mato-grossense. *Revista Estudo & Debate*, v. 24, 2017.

Anexo 1 – Tabelas

Tabela 1 - Informações das estações do INMET.

NOME DA ESTAÇÃO	CÓDIGO	COORDENADAS	ALTITUDE (m acima do nível do mar)	SITUAÇÃO	DISPONIBILIDADE	PERÍODICIDADE
Pontes e Lacerda	A937	Lat : -15,13444444, Long: -59.3461111	272,53	Em pane	Data inic : 01/01/2018, Data final : 01/01/2024	Diária
Salto do Céu	A936	Lat: -15.12472221 Long: -58.12722221	300,83	Operante	Data inic : 01/01/2018, Data final : dias atuais	Diária
VBST	A922	Lat: -15.06277777 Long: -59.8730555	213	Operante	Data inic : 01/01/2018, Data final : dias atuais	Diária
Tangará da Serra	A902	Lat: -14.65 Long: -57.4316666	440,01	Operante	Data inic : 01/01/2018, Data final : dias atuais	Diária

Tabela 2 - Valores dos coeficientes do modelo Bristow & Campbell - Adaptado de Ramos et al., 2018

Estações	Hargreaves e Samani	Bristow & Campbell		
	KT	“a”	“b”	“c”
Caxias	0,156	0,710	0,071	1,221
Corumbá	0,160	0,657	0,031	1,694
Cruzeiro do Sul	0,136	0,630	0,034	1,550
Cuiabá	0,132	0,519	0,038	1,680

Tabela 3 - Dados coletados da plataforma da usina de estudo. Fonte: o autor.

Data	Energia gerada (kWh)
18/07/2018	123,027
19/07/2018	132,294
20/07/2018	128,364
21/07/2018	110,422
22/07/2018	134,416

23/07/2018	137,323
24/07/2018	122,934
25/07/2018	13,192
26/07/2018	137,734
27/07/2018	33,531
28/07/2018	142,676
29/07/2018	136,491
30/07/2018	115,042
31/07/2018	133,669
01/08/2018	23,162
02/08/2018	140,181
03/08/2018	133,813
⋮	⋮
27/11/2023	123,284
28/11/2023	139,573
29/11/2023	126,214
30/11/2023	96,76
01/12/2023	0,073

Tabela 4 – Métricas estatísticas AOD Modis e AOD AERONET.

ORIGEM DE AOD	Média	Desvio Padrão	MAE	MSE	RMSE	R ²
Modis AOD	0,1850256	0,2086692	0,0706604	0,0170983	0,1307604	0,6073232
AERONET AOD	0,2082824	0,2353212				

Tabela 5 - Estatísticas para cada classe de PARF.

CLASSE DE AOD	Média	Desvio Padrão	Mediana
2020			
Baixa AOD	-17,270342	11,786920	-14,719

Alta AOD	-15,350143	15,268339	-14,543
2021			
Baixa AOD	3,855434	12,591303	5,968
Alta AOD	5,040420	11,880591	4,498
2022			
Baixa AOD	-31,876836	17,529725	-33,867
Alta AOD	-38,700046	14,620176	-37,960

Tabela 6 – Matriz de comparação entre classes através do teste post-hoc de Dunn.

CLASSE DE AOD	Baixa AOD	Média AOD	Alta AOD
Baixa AOD	1.000	1.000	0.000114
Alta AOD	0.000114	0.022138	1.000

Tabela 7 – Média de energia gerada

CLASSE DE AOD	Média
2020	
Baixa AOD	119,7509
Alta AOD	117,8307
2021	
Baixa AOD	116,3954
Alta AOD	115,2104
2022	
Baixa AOD	117,6152
Alta AOD	110,792

Anexo 2 – Artigo de revisão de literatura

Assessment of Atmospheric Aerosol Impacts on Photovoltaic Energy Performance: A Systematic Review of Radiative and Modeling Approaches

Bruno Neves de Campos^{1,2,*}, Nicolas Neves de Oliveira^{2,3}, Tiago Schmidt², Leone F.A. Curado², Thiago R. Rodrigues⁴, Rafael Palácios^{2,5,*}

¹ Federal Institute of Science and Technology of the State of Mato Grosso.

² Institute of Physics, Federal University of Mato Grosso.

³ Physics Department, University of Maryland, Baltimore County.

⁴ Institute of Physics, Federal University of Mato Grosso do Sul.

⁵ Faculty of Meteorology, Federal University of Pará

*Corresponding authors: Bruno Neves de Campos (bruno.nscampos@gmail.com), Rafael Palácios (rpalacios@ufpa.br).

Abstract

Atmospheric aerosols significantly influence photovoltaic (PV) energy production by modifying the magnitude and spectral distribution of solar irradiance reaching the surface. This review systematically evaluates methodologies used to assess aerosol impacts on photovoltaic systems, following the PRISMA 2020 framework. A scientometric analysis was conducted to identify research trends, geographic distribution, and dominant analytical approaches. The literature reveals that aerosol optical depth (AOD), relative irradiance (RI), and aerosol radiative forcing (ARF) are the most frequently applied indicators to quantify radiative attenuation and its energetic consequences. Radiative Transfer Models (RTM), including SMARTS-based simulations, are widely used to reconstruct spectral irradiance and evaluate photovoltaic response under variable atmospheric conditions. Beyond atmospheric characterization, the reviewed studies demonstrate direct implications for photovoltaic performance indicators such as energy yield, performance ratio, and capacity factors. Variations in aerosol loading alter both direct and diffuse radiation components, introducing uncertainties in energy forecasting and feasibility assessments, particularly in regions affected by biomass burning and desert dust transport. The integration of physically based models and empirical metrics emerges as a robust framework for reducing uncertainty in photovoltaic energy

prediction. These findings highlight the importance of incorporating aerosol-sensitive methodologies into solar resource assessment and long-term energy planning.

Keywords: Aerosol optical depth, Aerosol radiative forcing, Photovoltaic energy, Relative irradiance, Solar resource assessment, Solar irradiance attenuation.

1. Introduction

Solar energy is one of the renewable sources that can provide greater security in supplying energy demand, due to the abundance of solar resources, easy access to technology, and low implementation costs. Therefore, it has become a strategic component of global decarbonization and energy transition policies. Associated with this fact, the incentive to implement photovoltaic plants has led to a great popularization of this type of energy generation source, causing a jump in installed photovoltaic energy capacity from 23 GW in 2009 to 627 GW in 2019 of new PV plants (Ren21, 2020; Song et al., 2021). However, ensuring reliable photovoltaic performance requires accurate solar resource assessment and robust energy yield forecasting under varying atmospheric conditions.

Despite all this popularization, there are still several issues regarding the real impact of meteorological variables and particulate matter on PV plants that require more detailed studies, especially when it comes to short-term modeling of the energy output of PV systems (Chen et al., 2023). These uncertainties are particularly critical for short-term power forecasting and long-term energy yield estimation, as they propagate into key energy indicators such as performance ratio and capacity factor. Furthermore, significant advances are needed in monitoring and modeling approaches, since coarse spatial and temporal resolutions may introduce discrepancies in predicted energy output (Chen et al., 2023). Such discrepancies may ultimately affect financial return projections and long-term planning of large-scale photovoltaic plants.

One of the aspects with the greatest focus in the studies is particulate matter suspended in the atmosphere, more specifically a category classified as atmospheric aerosols, which can consist of solid particles, liquids, and agglomerates of solid and liquid particles (Rodrigues et al., 2024). Atmospheric aerosols emitted by biomass burning and industrial activities modify the radiative balance by scattering and absorbing solar radiation, thereby influencing the magnitude and spectral distribution of irradiance reaching photovoltaic modules (Rodrigues et al., 2024).

Furthermore, the efficiency of photovoltaic power generation systems is directly impacted by the presence of aerosols, since they can act as scatterers of the energy received in the atmosphere or as absorbers of this energy. This modulation affects both direct normal irradiance (DNI) and diffuse horizontal irradiance (DHI), altering the spectral composition of radiation incident on PV modules and consequently influencing electrical output. This is especially true for those emitted by forest fires, which are events responsible for large emissions of aerosols into the atmosphere, making them as impactful on the efficiency of PV plants as the deposition of dirt on the top of the panels (Gómez-Amo et al., 2019). In extreme pollution or dust events, significant daily energy losses may occur, reinforcing the need for robust impact assessment methodologies.

Therefore, a complete understanding of the impact of aerosols on the energy generation of photovoltaic systems is essential for decision-makers to carry out long-term planning in the implementation of PV plants, to take advantage of the best efficiency for these systems (Dhake et al., 2024). Incorporating aerosol characterization into solar energy modeling frameworks is critical for reducing uncertainty in photovoltaic performance forecasting and optimizing energy planning strategies. In view of this, the present study aims to identify within the literature which are the most used and most appropriate methodologies to carry out the evaluation of the impact of aerosols on photovoltaic systems. This study systematically identifies and critically evaluates these methodologies with emphasis on their applicability to energy performance assessment, highlighting the required variables, measurement strategies, and modeling implications for reliable photovoltaic energy yield estimation.

2. Data and methods

2.1 Data collection

The compilation of all the study material was completed after conducting structured searches in the databases of interest. To ensure reproducibility and consistency, identical search strings and filtering parameters were applied across all databases. On the first searches, a very small number of published works were found, requiring refinement of the search strategy to broaden the retrieval scope while maintaining thematic specificity.

Analyses were carried out on some of the works found to understand how the literature referred to the topic sought in their texts. Preliminary screening indicated that English-language queries provided more comprehensive coverage of the topic. The best results were obtained using the

terms "effect of aerosol" AND "photovoltaic modules", with the Boolean operator explicitly defined to ensure that both expressions appeared simultaneously in the indexed content. The search was configured to retrieve articles in which the defined terms appeared within the full record (title, abstract, and keywords), ensuring thematic relevance. Furthermore, no specific time frame was defined to ensure that the search results covered the entire period of publications related to the topic, allowing a panoramic and historically comprehensive analysis.

Initially, research was performed in three databases: two international (Scopus and Web of Science) and one regional database (SciELO). However, the SciELO database returned only two studies, which were also indexed in Scopus. Thus, to avoid redundancy and maintain database homogeneity, SciELO records were excluded, and only metadata from Scopus and Web of Science were retained for subsequent analysis.

2.2 Data preparation

After the searches, 38 related articles were found in the Scopus database, 16 in Web of Science, and 2 in SciELO, resulting in a total of 56 records. As SciELO records duplicated entries indexed to Scopus, they were excluded, resulting in 54 records for initial screening. To perform the scientometric analyses, metadata were exported and processed using routines implemented in the R programming language. Data preprocessing included duplicate removal, DOI verification, and document-type filtering to ensure analytical consistency and methodological transparency.

After the searches, 38 related articles were found in the Scopus database, 16 articles in the Web of Science database, and 2 works in the SciELO database, as mentioned in the previous section, resulting in a total of 56 works. However, since the number of works in the SciELO database was much smaller than the other two, and the works found there were also present in Scopus, the SciELO metadata was discarded, considering only the metadata from Scopus and Web of Science for analysis, thus leaving 54 works. To carry out the scientometric analyses, it was necessary to collect the metadata from the articles in both databases, and routines in the R language were used to perform an initial processing. This initial processing was important to eliminate possible biases from the analyses, such as duplicate works or articles published without a DOI.

Metadata from both databases were merged into a single dataframe. Duplicate detection was initially performed using title and keyword comparison, resulting in the removal of one record. A second verification step based on DOI matching removed one additional duplicate, resulting

in 50 unique records. A final screening stage excluded documents that were not peer-reviewed journal articles (e.g., conference abstracts or editorial materials). Twelve records were removed in this step, leading to a final dataset of 38 peer-reviewed articles. This structured selection process followed the PRISMA 2020 protocol to ensure transparency, replicability, and systematic reporting.

2.3 Data analysis

After the screening process, a structured database containing 38 peer-reviewed articles was established. The database included author information, affiliations, journal sources, publication year, country of origin, citation metrics, abstracts, keywords, and DOI identifiers. Text standardization procedures were applied to harmonize metadata fields and ensure consistency in subsequent analyses. The compiled database was subjected to scientometric analysis using the bibliometrix package and the Biblioshiny interface. This analysis allowed identification of collaboration networks, thematic evolution, and geographic distribution of publications related to aerosol impacts on photovoltaic systems.

In addition to the bibliometric evaluation, a comprehensive qualitative review of all selected articles was conducted. Each article was individually analyzed to extract methodological information related to:

1. Techniques used to quantify aerosol effects on photovoltaic systems.
2. Atmospheric and radiative variables employed.
3. Measurement instruments and modeling tools applied.

Based on this extraction, three secondary structured databases were developed. Cross-referencing and frequency analyses were implemented using Python routines to identify the

most recurrent methodological approaches and their applicability to energy performance assessment.

For the work, a robust methodology was used, ensuring transparency, traceability, and replicability of the review process, following the PRISMA 2020 guidelines (Page et al., 2021). The PRISMA workflow diagram is presented in Figure 1.

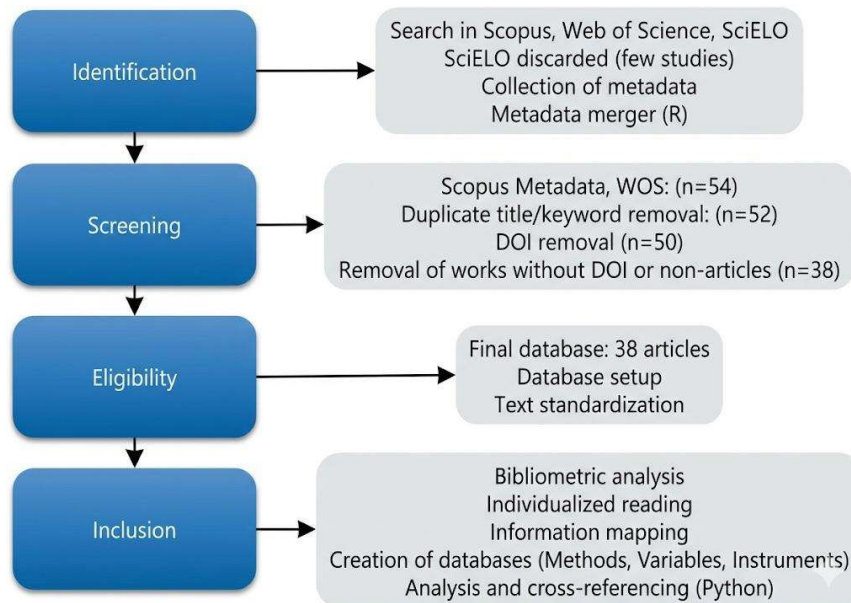


Figura 16 - Graphical representation of the workflow using the PRISMA 2020 Methodology. Adapted from Page et al. (2021).

3. Results and discussion

3.1 Scientometric analysis

3.1.1 Publication arrangement

With the organized database finally ready, a bibliometrix analysis routine implemented by the Biblioshiny interface was applied. This enabled a structured scientometric evaluation of the selected literature. This library allows the collection and analysis of the generated database, extracting information on collaboration networks between authors and other bibliographic indicators. One relevant output of this routine was the global distribution map of publications by country, shown in Figure 2. The darkest blue tones represent regions with higher publication density.

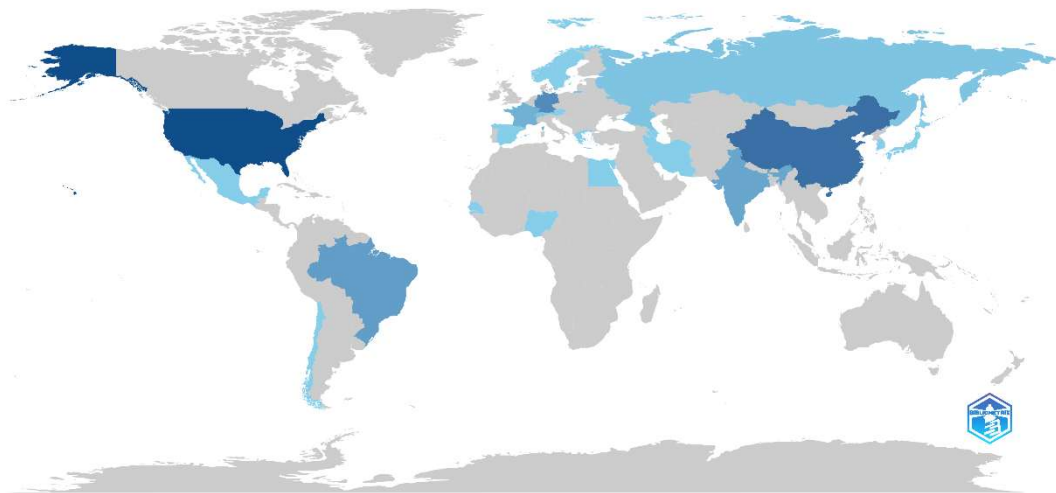


Figura 17 - World production map

The analysis of Figure 2 shows that the countries with the highest production are also those with strong participation in the photovoltaic manufacturing sector, such as the United States of America and China (Deng et al., 2011). China plays a dominant role in photovoltaic manufacturing, including module and inverter production, which may partly explain its research output in this domain.

Another relevant observation is the representativeness of developing countries. Brazil, India, Mexico, and South Africa appear among the contributing regions. Figure 3 presents the ranking of the most cited countries within the analyzed dataset. It is possible to confirm the information presented in Figure 2 by analyzing Figure 3, since the two most cited countries are also those with the highest publication output. Considering geopolitical aggregation, ranking positions may slightly vary, but Brazil remains among the most cited countries.

This may be associated with the rapid expansion of photovoltaic capacity in Brazil, including the addition of 25.6 GW between January and September 2023 (MME, 2023). European countries also present significant representation, reflecting consolidated research infrastructure and mature solar energy markets.

From an energy perspective, this geographic distribution suggests that research intensity correlates with both installed PV capacity and regional exposure to aerosol-prone environments.

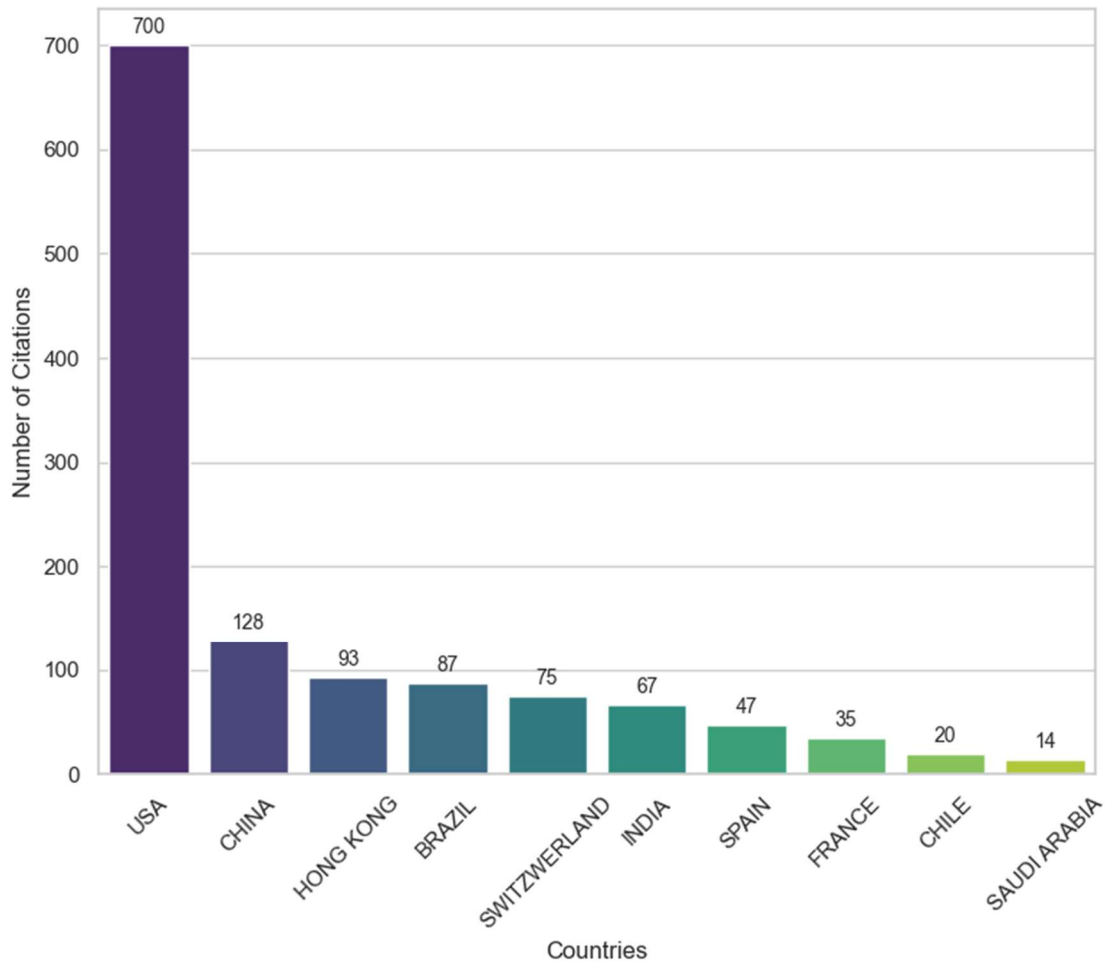


Figura 18 - Ranking of most cited countries.

3.1.2 Analysis of the focus of the studies

The investigation of the main database yielded information on the most frequently addressed topics; Figure 4 presents a word cloud illustrating these themes. Figure 4 shows strong emphasis on optical radiation variables and meteorological parameters such as wind speed and air temperature. It also highlights frequently applied assessment approaches, including spectral analyses, cloud cover evaluation, dust deposition studies, and albedo analysis. Additionally, the word cloud references several study regions such as West Africa, China, Chile, and India. These locations correspond to regions with significant solar resource potential and varying aerosol regimes.

Figure 4 also indicates interest in photovoltaic technology characteristics, such as cell materials and module glass properties, reflecting efforts to improve system efficiency under different atmospheric conditions (Debono et al., 2023). Furthermore, modeling approaches such as

Machine Learning and Deep Learning are observed (Alwadei et al., 2022), demonstrating increasing integration between atmospheric analysis and predictive energy modeling. This integration reflects a shift toward hybrid modeling frameworks combining physical radiative models and data-driven forecasting techniques for photovoltaic performance prediction.

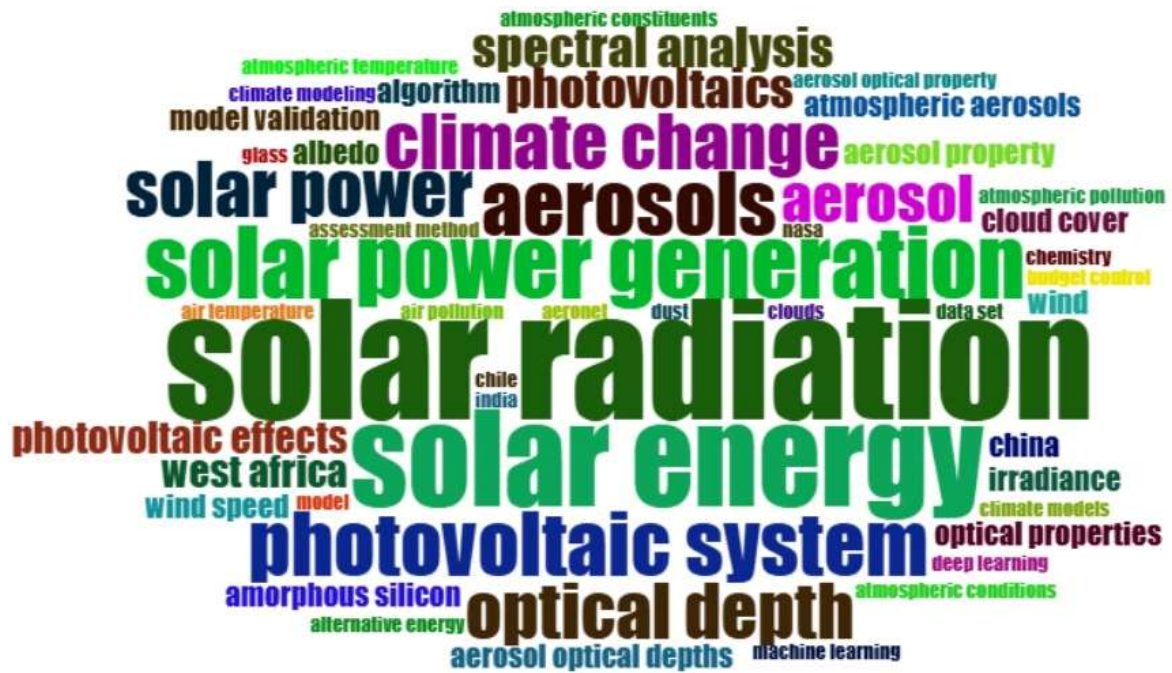


Figura 19 - Cloud of themes addressed in the articles.

Another analysis of the topics covered is presented in Figure 5, through the relationship between the topics. The thicker lines seen in Figure 5 represent a more intense relationship between the topics, while the thinner lines represent a less intense relationship. Figure 5 shows two large focus groups, showing that the work focuses on studies of received radiation, represented by the group of blue points, and aerosols, represented by the group of red points. It also shows that these two topics are always studied together, which can be seen in Figure 5 by the thick line connecting the topic "solar radiation" with the topic "aerosol".

Figure 5 also reveals what is analyzed about each topic. For example, when analyzing "solar radiation," optical properties of aerosols are analyzed, spectral analyses are performed, albedo analyses are performed, and irradiance analyses are carried out, which can be visualized through the lines that come out of the topic "solar radiation." Furthermore, it is possible to see that when working on climate change, analyses are made regarding solar radiation, the presence of aerosols, air temperature, climate models are created, among other things.

Global Horizontal Irradiance (GHI) and Direct Normal Irradiance (DNI) are among the most analyzed parameters (Nofuentes et al., 2017, Nouri et al., 2021, Yuan et al., 2023). Since high-resolution spectral measurements are not always available, Radiative Transfer Models (RTM) are frequently used to reconstruct spectral irradiance from broadband observations (Chen et al., 2023; Kim et al., 2023; Paudyal et al., 2024).

The presence of aerosols generally increases the diffuse fraction of radiation due to enhanced scattering processes. Several studies express this effect through the Diffuse-to-Direct Ratio (DDR), which shows approximately linear growth with increasing AOD (Kaskaoutis et al., 2016; Kambezidis et al., 2016; Mikhalev et al., 2019; Chakraborty, Lee, 2021; Paudyal et al., 2024). Among the evaluated variables, Aerosol Optical Depth (AOD) stands out as a key indicator of radiative attenuation. While direct and diffuse irradiance provide surface-level response, AOD enables quantification of aerosol loading in the atmospheric column (Song et al., 2021; Dhake et al., 2024; Asadov et al., 2024).

The methodological ranking presented in Figure 7 indicates that SMARTS-based simulations appear most frequently. Although SMARTS is a simplified radiative transfer model, its computational efficiency makes it attractive for operational solar assessments. More complex RTM frameworks provide higher spectral fidelity when required. Statistical validation methods frequently accompany modeling approaches to evaluate uncertainty and predictive performance. Relative Irradiance (RI) appears less frequently but provides important information regarding surface radiation attenuation. It expresses the ratio between measured irradiance under actual atmospheric conditions and expected irradiance under low-AOD (clear-sky) conditions (Cirino et al., 2014)

Although radiation information directly shows how energy is being received at the surface, several studies point to the need to include meteorological variables in photovoltaic energy generation analyses, as they can offer additional information (Chen et al., 2023; Mahima et al., 2023). In Figure 7, the Single Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine (SMARTS) appears in first place. In second place are 6 methodologies that were used in 4 different studies (Kaskaoutis et al., 2016; Gueymard, 2019; Kim et al., 2023; Paudyal et al., 2024).

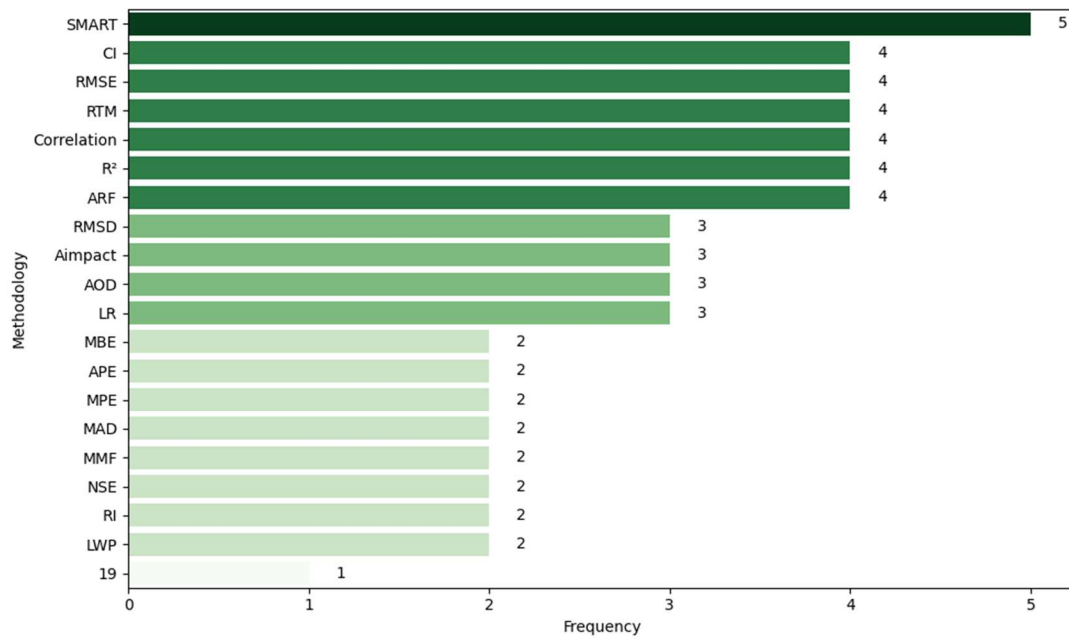


Figura 22 - 20 most applied methodologies in studies

In addition to the ranking presented in Figure 7, a word cloud was also created showing the techniques used in the studies. This word cloud can be seen in Figure 8, where the information presented in Figure 7 is very clear, showing that the SMARTS and RTM models are among the most used methodologies for analyzing the impact of aerosols on photovoltaic systems. Another method that appears in both Figure 7 and Figure 8 is the Relative Irradiance (RI) method, represented by f in the studies.



Figura 23 - Word cloud showing the techniques used.

In Figure 8, it is possible to see that the RI technique appears with a smaller size compared to the other methodologies, just as in Figure 7 it appears sharing the fourth position with other techniques that appear only 2 times in the works found. However, the works that use this methodology also use another technique that appears more often, which is CI. The use of this methodology is important in studies where data showing direct values of cloud cover with measuring equipment are not available, and therefore it is necessary to apply some methodology that is able to represent the presence or absence of clouds in the studied region.

As mentioned earlier, the RI technique was found using 2 works from the initial database, however, in both works the strong relationship between sky cover and the value returned by the technique is demonstrated, in one of the works its relationship with AOD is seen (Cirino et al., 2014) and in the other its relationship with the clear sky index is demonstrated (Yu et al., 2024). In the two studies mentioned, it is possible to verify that RI decreases with increasing sky cover, whether this cover is caused by the entry of aerosols or by the presence of clouds.

3.3 Energy Performance Implications for Photovoltaic Systems

The methodological findings presented above demonstrate that aerosol assessment is not limited to atmospheric characterization but directly influences photovoltaic energy performance indicators. Variations in AOD, spectral attenuation, and diffuse fraction modify the effective irradiance available to modules, thereby impacting energy yield, performance ratio, and capacity factors. Spectral distortions induced by aerosols can generate mismatch losses between the incident solar spectrum and the spectral response of photovoltaic materials. In this context, RTM-based simulations become particularly important for technologies sensitive to wavelength-dependent attenuation. Failure to incorporate spectral variability may lead to systematic overestimation of expected energy production.

Relative Irradiance (RI) and Aerosol Radiative Forcing (ARF) offer complementary operational insights. RI reflects relative surface attenuation, while ARF translates atmospheric perturbations into direct energetic consequences. When applied jointly, these methodologies enable both detection and quantification of aerosol-induced performance losses. The interaction between aerosols and cloud covers introduces non-linear effects. Moderate aerosol concentrations may increase diffuse irradiance, partially compensating for reductions in direct radiation under specific system configurations. However, under high turbidity scenarios, the dominant effect is a reduction in total irradiance and net energy output.

From an energy planning perspective, neglecting aerosol variability may lead to optimistic yield projections, underestimated uncertainty margins, and increased financial risk in feasibility studies. This is particularly critical in regions frequently affected by biomass burning or deserted dust transport. Incorporating aerosol-sensitive methodologies into solar resource assessment frameworks enhances reliability in long-term photovoltaic performance forecasting. The integration of physically based models (RTM), empirical indicators (RI), and forcing-based metrics (ARF) therefore represents a robust analytical framework for reducing uncertainty in photovoltaic energy prediction. Such integrated approaches are essential for emerging solar markets where atmospheric variability strongly influences system performance.

4. Conclusions

In this work, a standardized search was conducted for articles that evaluated the impact of aerosols on photovoltaic plants. The objective was to systematically identify and evaluate the methodologies most frequently employed to assess aerosol impacts on photovoltaic systems, with the entire process carried out with the support of the PRISMA 2020 methodology (Page et al., 2021). After extensive reading of the literature, it was observed that most studies use some type of modeling in their development, whether to obtain data or to predict the values of some variable in the short or long term. The scientometric analysis revealed that research activity is concentrated in regions with strong photovoltaic deployment and significant exposure to aerosol-prone environments, indicating a direct relationship between atmospheric variability and energy system performance concerns.

In these studies, it was seen that techniques that use computational analyses for data acquisition and scenario simulations are widely used, even because several countries do not have surface stations for data measurements. However, reliance on modeling frameworks introduces uncertainties that must be quantified through statistical validation and sensitivity analysis. To assess their viability, modeling techniques are commonly associated with statistical analyses to evaluate errors, deviations, and residuals. Furthermore, it was observed that the analysis of the effects of aerosols through relative irradiance proved to be quite effective, as it can provide a percentage relationship of the amount of energy that should be available on the surface, being extremely efficient in representing atmospheric turbidity. In addition, when used in conjunction with aerosol radiative forcing, it can allow quantification of the impact of aerosols directly on the variable of interest, offering a complete visualization of the attenuations or increases in the variables of interest.

Beyond atmospheric characterization, the reviewed methodologies demonstrate direct implications for photovoltaic energy performance indicators such as energy yield, performance ratio, and capacity factor. Variations in aerosol optical depth (AOD), spectral attenuation, and diffuse radiation fraction modify the effective irradiance incident on modules, leading to measurable variations in electrical output. Integrated approaches combining radiative transfer models (RTM), relative irradiance (RI), and aerosol radiative forcing (ARF) provide a robust analytical framework for linking atmospheric processes to photovoltaic performance. These approaches reduce uncertainty in energy yield forecasting and enhance reliability in solar resource assessment.

Therefore, the work proved to be efficient this review contributes by consolidating methodological knowledge and clarifying the operational relevance of aerosol-sensitive assessment techniques, offering a comprehensive overview of available analytical strategies. The findings highlight that neglecting aerosol variability may lead to systematic overestimation of long-term photovoltaic yield and underestimation of financial risk in feasibility studies. Future research should prioritize the integration of aerosol characterization into hybrid forecasting systems that combine physical radiative modeling and data-driven techniques, particularly in emerging solar markets affected by biomass burning and desert dust transport.

5. References

Alwadei, S., Ashraf Farahat, Ahmed M, Kambezidis HD (2022) Prediction of Solar Irradiance over the Arabian Peninsula: Satellite Data, Radiative Transfer Model, and Machine Learning Integration Approach. *Applied Sciences* 12:717–717. <https://doi.org/10.3390/app12020717>.

Asadov HH, Alieva AJ, Ashrafov MG (2024) Investigation of Possibility of Measuring the Albedo of Earth's Surface in Visible and Near Infrared Bands in Conditions of Aerosol Pollution of Atmosphere Using Unmanned Aerial Vehicles. *Visnyk NTUU KPI Seriiia - Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia* 96:28–31. <https://doi.org/10.20535/radap.2024.96.28-31>.

Chakraborty T, Lee X (2021) Large Differences in Diffuse Solar Radiation Among Current-Generation Reanalysis and Satellite-Derived Products. *Journal of Climate* 34:1–52. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-20-0979.1>.

Chen Y, Yue X, Tian C, et al (2023) Assessment of solar energy potential in China using an ensemble of photovoltaic power models. *Science of The Total Environment* 877:162979. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162979>.

Cirino GG, Souza RAF, Adams DK, Artaxo P (2014) The effect of atmospheric aerosol particles and clouds on net ecosystem exchange in the Amazon. *Atmospheric Chemistry and Physics* 14:6523–6543. <https://doi.org/10.5194/acp-14-6523-2014>.

Debono A, L'Hostis H, Amelle Rebai, et al (2023) Synergistic effect between molybdenum back contact and CIGS absorber in the degradation of solar cells. *Progress in Photovoltaics Research and Applications* 32:137–155. <https://doi.org/10.1002/pip.3742>.

Dhake, H., Panagiotis Kosmopoulos, Antonis Mantakas, et al (2024) Climatological Trends and Effects of Aerosols and Clouds on Large Solar Parks: Application Examples in Benban (Egypt) and Al Dhafrah (UAE). *Remote Sensing* 16:4379–4379. <https://doi.org/10.3390/rs16234379>.

Gómez-Amo, J.L., M.D. Freile-Aranda, J. Camarasa, et al (2019) Empirical estimates of the radiative impact of an unusually extreme dust and wildfire episode on the performance of a photovoltaic plant in Western Mediterranean. *Applied energy* 235:1226–1234. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.11.052>.

Gueymard CA (2019) The SMARTS spectral irradiance model after 25 years: New developments and validation of reference spectra. *Solar Energy* 187:233–253. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.05.048>.

Herman-Czezuch A, Mekeng AZ, Meilinger S, et al (2022) Impact of aerosols on photovoltaic energy production using a spectrally resolved model chain: Case study of southern West Africa. *Renewable Energy* 194:321–333. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.04.166>

Jose S, Nair VS, Babu SS (2020) Anthropogenic emissions from South Asia reverses the aerosol indirect effect over the northern Indian Ocean. *Scientific Reports* 10: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-74897-x>.

Kambezidis, B.E. Psiloglou, Karagiannis D, et al (2016) Recent improvements of the Meteorological Radiation Model for solar irradiance estimates under all-sky conditions. *Renewable Energy* 93:142–158. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.02.060>.

Kim, C.K., Kim H-G, Kang Y-H, Oh M (2023) Comprehensive Analysis of Spectral Mismatch Factor for Solar Cells Based on In Situ Observation of Aerosol Optical Depth Spectra and Solar Spectral Irradiance in Korea. *International journal of energy research* 2023:1–16. <https://doi.org/10.1155/2023/2617427>.

Mahima, N., Karakoti I, Hemwati Nandan, Pathak PP (2023) An empirical technique to predict monthly mean global solar radiation for PV applications in Indian context. *Environmental Progress & Sustainable Energy* 43: <https://doi.org/10.1002/ep.14277>.

Mikhalev AV, Tashchilin MA, Sakerin SM (2019) Effect of Atmospheric Aerosol on Ground-Based Airglow Observations. *Atmospheric and Oceanic Optics* 32:410–415. <https://doi.org/10.1134/s1024856019040109>

MME (2023). Ministério de Minas e Energia. Brasil bate recorde de expansão da energia solar em 2023. <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/>.

Nofuentes G, Gueymard CA, Aguilera J, et al (2017) Is the average photon energy a unique characteristic of the spectral distribution of global irradiance? *Solar Energy* 149:32–43. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.03.086>

Nouri B, Blum N, Wilbert S, Zarzalejo LF (2021) A Hybrid Solar Irradiance Nowcasting Approach: Combining All Sky Imager Systems and Persistence Irradiance Models for Increased Accuracy. *Solar RRL* 6:2100442. <https://doi.org/10.1002/solr.202100442>.

Page MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM, et al (2021) The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *British Medical Journal* 372: <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>.

Paudyal BR, Somasundaram SG, Louwen A, et al (2024) Analysis of spectral irradiance variation in northern Europe using average photon energy distributions. *Renewable Energy* 224:120057. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120057>

REN21, (2020). RENEWABLES 2020 GLOBAL STATUS REPORT. In: Ren21.net. https://www.ren21.net/gsr-2020/chapters/chapter_01/chapter_01/

Rodrigues, S., Cirino, G., Moreira, D. et al (2024). Enhanced net CO₂ exchange of a semideciduous forest in the southern Amazon due to diffuse radiation from biomass burning. *Biogeosciences* 2024, 21 (3), 843–868. <https://doi.org/10.5194/bg-21-843-2024>.

Song Z, Liu J, Yang H (2021) Air pollution and soiling implications for solar photovoltaic power generation: A comprehensive review. *Applied Energy* 298:117247. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117247>.

Yu, E., Rakhimov, Avezova NR, Samad Emamgholizadeh, Mansour Ziaii (2024) Assessment of the Technical Potential of PV Stations on the Example of the Fergana Valley. Part II: Analysis of Sunny, Partly Cloudy and Cloudy Days. *Applied Solar Energy* 60:346–356. <https://doi.org/10.3103/s0003701x24602199>.

Yuan X, Xia Y, He J, et al (2023) Study on Accuracy Evaluation of MODIS AOD Products and Spatio-Temporal Distribution Characteristics of AOD in Hangzhou. *Sustainability* 15:10171. <https://doi.org/10.3390/su151310171>