



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

**Validação do Potencial Uso de Dados de Reanálises Atmosféricas e Dados do Modelo Atmosférico Brasileiro para Estimativa de Radiação Solar Considerando o Efeito dos Aerossóis Atmosféricos**

Bruno Ribeiro Herdies

Relatório de Iniciação Científica do programa  
PIBIC, orientado pelo Dr. Éder Paulo Vendrasco.

CGCT/INPE  
Cachoeira Paulista, SP  
Agosto de 2023



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

**Validação do Potencial Uso de Dados de Reanálises Atmosféricas e Dados do Modelo Atmosférico Brasileiro para Estimativa de Radiação Solar Considerando o Efeito dos Aerossóis Atmosféricos**

Bruno Ribeiro Herdies

Relatório de Iniciação Científica do programa  
PIBIC, orientado pelo Dr. Éder Paulo Vendrasco.

CPTEC/INPE  
Cachoeira Paulista, SP  
Agosto 2023

## RESUMO

Este estudo concentra-se na geração de energia solar como uma fonte alternativa de energia renovável no Brasil, impulsionado pela crescente demanda nesse setor. Nos últimos anos, a tecnologia de energia fotovoltaica tem experimentado avanços significativos, resultando em maior eficiência e redução de custos. No entanto, no Brasil, a disponibilidade de dados observados sobre a irradiação solar, essenciais para validar o potencial de geração dessa forma de energia, é extremamente limitada. Dado que em algumas regiões do país os únicos dados disponíveis são extrapolados de estações meteorológicas de outras localidades, este estudo adota a abordagem de utilizar dados de modelos meteorológicos para preencher essas lacunas. O estudo concentrou-se na utilização da segunda geração da reanálise MERRA-2, que tem como diferencial positivo a assimilação de dados de aerossol, fornecidos pelo GMAO/NASA, para estimar a irradiação solar em regiões tropicais e subtropicais do Brasil. Além disso, a pesquisa empregou a simulação do BAM (Brazilian Global Atmospheric Model), considerando diferentes cenários, como a inclusão de aerossóis climatológicos, fixos e ausência total de aerossóis. Essa abordagem possibilitou uma avaliação do impacto desses cenários na estimativa da irradiação solar, validada por meio de dados observacionais coletados em estações de superfície pelo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). As variáveis utilizadas da reanálise atmosférica MERRA-2 e analisadas neste trabalho são: Surface Net Downward Shortwave Flux (SWGNT), Surface Net Downward Shortwave Flux assumindo nenhum aerossol (SWGNTCLN), Surface Net Downward Shortwave Flux assumindo céu claro (SWGNTCLR) e o Surface Net Downward Shortwave Flux assumindo céu claro e sem aerossol (SWGNTCLRCLN). Inicialmente, os dados de oito estações meteorológicas foram comparados com as estimativas de dados de reanálise, onde a cobertura de nuvens e a inclusão de aerossóis foram levadas em consideração. O estudo revelou uma alta correlação entre as observações e os modelos MERRA 2 e BAM, constatando a relevância do efeito das nuvens na estimativa da irradiação solar. O MERRA-2 obteve os melhores resultados ao considerar o efeito de aerossol em situações de alta concentração como, por exemplo, em setembro em Campo Grande. O BAM, por sua vez, reproduz bem o efeito do aerossol, apesar de apresentar um viés negativo na radiação. Levando em conta a complexidade da reanálise e o procedimento adotado no BAM, o modelo do INPE demonstrou resultados satisfatórios. Na próxima etapa do estudo serão consideradas todas as regiões do Brasil, ampliando o estudo e buscando entender melhor o efeito das nuvens e dos aerossóis na irradiação solar dos modelos estudados.

**Palavras-chave:** Reanálises. Irradiação Solar. Modelo Global Atmosférico Brasileiro. Reanalyses. Solar Irradiation. Brazilian Atmospheric Model.

## ABSTRACT

This study focuses on solar energy generation as an alternative source of renewable energy in Brazil, driven by the growing demand in this sector. In recent years, photovoltaic energy technology has undergone significant advancements, resulting in increased efficiency and cost reduction. However, in Brazil, the availability of observed solar irradiation data, essential for validating the generation potential of this form of energy, is extremely limited. Given that in some regions of the country the only available data is extrapolated from weather stations in other locations, this study adopts the approach of using data from meteorological models to fill these gaps. The study focused on using the second generation of the MERRA-2 reanalysis, which has the positive feature of assimilating aerosol data provided by GMAO/NASA, to estimate solar irradiation in tropical and subtropical regions of Brazil. Furthermore, the research employed the simulation of the BAM (Brazilian Global Atmospheric Model), considering different scenarios, such as the inclusion of climatological aerosols, fixed aerosols, and a total absence of aerosols. This approach allowed an evaluation of the impact of these scenarios on solar irradiation estimation, validated through observational data collected at surface stations by INMET (National Institute of Meteorology). The variables used from the MERRA-2 reanalysis and analyzed in this work are Surface Net Downward Shortwave Flux (SWGNT), Surface Net Downward Shortwave Flux assuming no aerosol (SWGNTCLN), Surface Net Downward Shortwave Flux assuming clear sky (SWGNTCLR), and Surface Net Downward Shortwave Flux assuming clear sky and no aerosol (SWGNTCLRCLN). Initially, data from eight weather stations were compared with reanalysis data estimates, considering cloud cover and aerosol inclusion. The study revealed a high correlation between observations and the MERRA-2 and BAM models, highlighting the relevance of cloud effects in solar irradiation estimation. MERRA-2 achieved the best results when considering aerosol effects in situations of high concentration, such as in September in Campo Grande. BAM, on the other hand, reproduces aerosol effects well, despite exhibiting a negative bias in radiation. Considering the complexity of the reanalysis and the approach adopted in BAM, the INPE model demonstrated satisfactory results. In the next stage of the study, all regions of Brazil will be considered, expanding the research and seeking a better understanding of the effects of clouds and aerosols on the solar irradiation of the studied models.

**Keywords:** Reanalysis, Solar Irradiation, Renewable Energy, Brazilian Global Atmospheric Model, MERRA-2 Reanalysis and INMET Stations.

## LISTA DE FIGURAS

**Pág.**

- Figura 1: Localização das estações utilizadas neste estudo. Estação de Caicó (preto), estação de Campo Grande (azul) e estação de Taubaté (branco). Fonte: Produção do autor. . . . . 16
- Figura 2 – Componentes da Irradiância Solar. Fonte: Pereira et al., 2017. . . . . 19
- Figura 3 - O padrão diurno médio (a), a média mensal de irradiação solar observada (b) e a série temporal mensal (c) na estação de Taubaté (linha verde claro). As estimativas de irradiação solar da reanálise MERRA-2 são: SWGNT (linha preta), SWGNTCLN (linha vermelha), SWGNTCLR (verde escuro) e SWGNTCLRCLN (linha azul), respectivamente. As estimativas do modelo BAM são: NSWRF\_clim (amarelo contínuo), NSWRF\_cte (amarelo pontilhado) e NSWRF\_zero (amarelo contínuo-pontilhado). A linha rosa representa o AOD (Profundidade Óptica do Aerossol). Fonte: Produção do autor. . . . . 20
- Figura 4 - O padrão diurno médio (a) e a média mensal de irradiação solar observada (b) sobre a estação de Caicó (linha verde claro). As estimativas de irradiação solar da reanálise MERRA-2 são: SWGNT (linha preta), SWGNTCLN (linha vermelha), SWGNTCLR (verde escuro) e SWGNTCLRCLN (linha azul), respectivamente. As estimativas do modelo BAM são: NSWRF\_clim (amarelo contínuo), NSWRF\_cte (amarelo pontilhado) e NSWRF\_zero (amarelo contínuo-pontilhado). A linha rosa representa o AOD (Profundidade Óptica do Aerossol). Fonte: Produção do autor. . . . . 22
- Figura 5 - O padrão diurno médio (a), a média mensal de irradiação solar observada (b) e a série temporal mensal (c) sobre a estação de Barreiras (linha verde claro). As estimativas de irradiação solar da reanálise MERRA-2 são: SWGNT (linha preta), SWGNTCLN (linha vermelha), SWGNTCLR (verde escuro) e SWGNTCLRCLN (linha azul), respectivamente. As estimativas do modelo BAM são: NSWRF\_clim (amarelo contínuo), NSWRF\_cte (amarelo pontilhado) e NSWRF\_zero (amarelo contínuo-pontilhado). A linha rosa representa o AOD (Profundidade Óptica do Aerossol). Fonte: Produção do autor. . . . . 23
- Figura 6 - O padrão diurno médio (a), a média mensal de irradiação solar observada (b) e a série temporal mensal (c) sobre a estação de Santa Maria (linha verde claro). As estimativas de irradiação solar da reanálise MERRA-2 são: SWGNT (linha preta), SWGNTCLN (linha vermelha), SWGNTCLR (verde escuro) e SWGNTCLRCLN (linha azul), respectivamente. As estimativas do modelo BAM são: NSWRF\_clim (amarelo contínuo), NSWRF\_cte (amarelo pontilhado) e NSWRF\_zero (amarelo contínuo-pontilhado). A linha rosa representa o AOD (Profundidade Óptica do Aerossol). Fonte: Produção do autor. . . . . 24
- Figura 7 - O padrão diurno médio (a), a média mensal de irradiação solar observada (b) e a série temporal mensal (c) sobre a estação de Goiânia (linha verde claro). As estimativas de irradiação solar da reanálise MERRA-2 são: SWGNT (linha preta), SWGNTCLN (linha vermelha), SWGNTCLR (verde escuro) e SWGNTCLRCLN (linha azul), respectivamente. As estimativas do modelo BAM são: NSWRF\_clim (amarelo contínuo), NSWRF\_cte (amarelo pontilhado) e

NSWRF_zero (amarelo contínuo-pontilhado). A linha rosa representa o AOD (Profundidade Óptica do Aerossol). Fonte: Produção do autor. ....	25
Figura 8 - O padrão diurno médio (a), a média mensal de irradiação solar observada (b) e a série temporal mensal (c) sobre a estação de Bauru (linha verde claro). As estimativas de irradiação solar da reanálise MERRA-2 são: SWGNT (linha preta), SWGNTCLN (linha vermelha), SWGNTCLR (verde escuro) e SWGNTCLRCLN (linha azul), respectivamente. As estimativas do modelo BAM são: NSWRF_clim (amarelo contínuo), NSWRF_cte (amarelo pontilhado) e NSWRF_zero (amarelo contínuo-pontilhado). A linha rosa representa o AOD (Profundidade Óptica do Aerossol). Fonte: Produção do autor. ....	26
Figura 9 - O padrão diurno médio (a), a média mensal de irradiação solar observada (b) e a série temporal mensal (c) sobre a estação de Três Lagoas (linha verde claro). As estimativas de irradiação solar da reanálise MERRA-2 são: SWGNT (linha preta), SWGNTCLN (linha vermelha), SWGNTCLR (verde escuro) e SWGNTCLRCLN (linha azul), respectivamente. As estimativas do modelo BAM são: NSWRF_clim (amarelo contínuo), NSWRF_cte (amarelo pontilhado) e NSWRF_zero (amarelo contínuo-pontilhado). A linha rosa representa o AOD (Profundidade Óptica do Aerossol). Fonte: Produção do autor. ....	27
Figura 10 - O padrão diurno médio (a) e a média mensal de irradiação solar observada (b) sobre a estação de Campo Grande (linha verde claro). As estimativas de irradiação solar da reanálise MERRA-2 são: SWGNT (linha preta), SWGNTCLN (linha vermelha), SWGNTCLR (verde escuro) e SWGNTCLRCLN (linha azul), respectivamente. As estimativas do modelo BAM são: NSWRF_clim (amarelo contínuo), NSWRF_cte (amarelo pontilhado) e NSWRF_zero (amarelo contínuo-pontilhado). A linha rosa representa o AOD (Profundidade Óptica do Aerossol). Fonte: Produção do autor. ....	28
Figura 11 – a) Pluma de poluição poluente em setembro e b) comparação de um dia com o céu limpo e com o céu poluído em Ji – Paraná RO. Fonte: Angel et al. 2021 (BAMS) e CPTEC/INPE. ....	29
Figura 12 - Diagramas de Taylor para a correlação média anual e desvio padrão das estações Caicó, Campo Grande e Taubaté, utilizando como referência a irradiação solar observada. Fonte: Produção do autor. ....	30

## LISTA DE TABELAS

**Tabela 1.** Informações sobre as estações meteorológicas. Fonte: Produção do autor. . . . . 17

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BAM: Brazilian Global Atmospheric Model

INPE: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

INMET: Instituto Nacional de Meteorologia.

NASA: National Aeronautics and Space Administration.

GMAO: Global Modeling and Assimilation Office.

MERRA-2: *Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications*, version 2.

GEOS-5: *Goddard Earth Observing System*, versão 5.12.4.

GSI: *Gridded Statistical Interpolation System*.

SWGNT: Surface Net Downward Shortwave Flux

SWGNTCLN: Surface Net Downward Shortwave Flux assuming no aerosol.

SWGNTCLR: Surface Net Downward Shortwave Flux assuming clear sky.

SWGNTCLRCLN: Surface Net Downward Shortwave Flux assuming clear sky and no aerosol.



## Sumário

<b>Sumário .....</b>	<b>10</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>11</b>
1.1 Objetivo Geral .....	12
1.2 Objetivos específicos .....	12
<b>2 REVISAO BIBLIOGRAFICA.....</b>	<b>13</b>
<b>3 DADOS E METODOLOGIA .....</b>	<b>14</b>
3.1 Observações e Conjunto de Dados de Reanálise .....	15
<b>4 RESULTADOS.....</b>	<b>19</b>
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>31</b>
<b>6 Referências bibliográficas .....</b>	<b>33</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Durante os últimos anos diversos estudos têm sido realizados buscando avaliar o potencial de energias renováveis em todo o globo, associado ao aumento crescente dos impactos de mudanças climáticas. O Brasil, devido à sua localização equatorial e com grande potencial de uso de energia solar e eólica, apresentou uma grande alteração em sua matriz energética, incluindo fontes alternativas de geração de energia. Este crescimento foi possível devido ao desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e de menor custo. Apesar de toda a evolução no desenvolvimento de novos sistemas, a disponibilidade de dados observados é bem limitada, e alguns poucos estudos utilizam dados estimados via satélite (Martins et al., 2007, Viana, et al., 2011) ou extrapolações de dados observados em outras regiões (Tiba 2000), o que compromete o uso eficiente de novas tecnologias. Um dos mais importantes estudos nessa área é a publicação do *Atlas Brasileiro de Energia Solar* (Pereira et al., 2017), em sua segunda edição, onde são utilizados dados observados e de satélite, com o uso de modelo de transferência radiativa BRASIL-SR (Pereira et al., 1996).

Estudos recentes (Boiley and Wald, 2015, Tahir et al., 2018, Sianturi et al., 2020) tem utilizado informações de dados de reanálises meteorológicas globais para estimar a radiação solar que atinge a superfície terrestre. Reanálises meteorológicas utilizam o estado da arte em modelagem numérica e um sistema de assimilação de dados, em que dados observados de diversas variáveis de estado, tais como pressão de superfície, temperatura, umidade e dados de vento, entre outras, são utilizados para compor uma análise retrospectiva dos diversos parâmetros atmosféricos. No procedimento de assimilação de dados, utilizado para compor o estado da atmosfera em um dado instante, são utilizados dados de diversas fontes, incluindo dados de estações em superfície, de navios, de aviões, de radiossondagens e estimados por satélites; e uma condição inicial da atmosfera proveniente de modelos de previsão numérica de tempo (PNT). Apesar do potencial destes estudos, com altas resoluções temporais e espaciais (horárias e dezenas de km, respectivamente), existem poucos registros de uso de dados de reanálises para o Brasil em trabalhos de irradiância solar (radiação solar por unidade de área), o que motivou a realização da primeira fase do presente estudo, que resultou na publicação de três trabalhos que foram apresentados em eventos nacionais e internacionais (Herdies et al., 2021a, Herdies et al., 2021b e Herdies et al., 2022).

A segunda parte deste trabalho envolve o uso de dados de reanálises do MERRA-2 (*Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications*, version 2, Gelaro et al. 2017) da NASA (*National Aeronautics Space Administration*) e do modelo global do Centro de Previsão e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), o BAM (*Brazilian Atmospheric Model*, Figueroa et al., 2016), em sua versão mais recente, em fase de testes, a qual inclui os efeitos dos aerossóis atmosféricos, sendo este um dos pontos principais da presente pesquisa.

### **1.1 Objetivo Geral**

O objetivo do presente estudo é analisar informações que possibilitem avaliar e caracterizar a variabilidade temporal da irradiação solar nas diversas regiões do Brasil, através de dados de reanálises atmosféricas do MERRA-2 e do modelo BAM, evidenciando que ambos os sistemas incluem os efeitos dos aerossóis em sua configuração, e serão validados através do uso de dados observados de radiação em superfície.

### **1.2 Objetivos específicos**

- Fazer o levantamento da base de dados observacionais disponível de radiação solar nas diversas regiões do Brasil;
- Realizar o controle de qualidade dos dados observacionais;
- Fazer a avaliação das reanálises meteorológicas disponibilizadas pela NASA e os dados do BAM disponibilizados pelo INPE para a estimativa de radiação solar;
- Avaliar os efeitos dos aerossóis na componente de radiação dos modelos e caracterizar o impacto dessa componente na geração de energia fotovoltaica;
- Caracterizar a variabilidade temporal e espacial da radiação solar nas diferentes regiões do Brasil, fazendo uso de dados de reanálise do MERRA-2 e do modelo BAM, levando em consideração o efeito dos aerossóis na radiação solar.

## 2 REVISAO BIBLIOGRAFICA

O uso de dados de reanálises representa uma importante fonte de informação para aplicações científicas no uso de radiação solar para fins de geração de energia fotovoltaica. Boiley and Wald (2018) analisaram os dados das reanálises do MERRA (Rienecker et al., 2011), do GMAO/NASA, e do ERA-Interim, do ECMWF, comparando os mesmos com dados observados em localidades da Europa, África e Oceano Atlântico, onde foi evidenciado a tendência de ambas reanálises a apresentar condições de céu claro, quando o observado é céu com nebulosidade e com menor frequência o oposto, deixando claro que essa superestimação de céu claro leva a uma superestimação da irradiação. Sendo essa característica menos evidente na reanálise do ERA-Interim. Em regiões de pouca nebulosidade os efeitos de superestimativa são menores, sendo recomendado o uso das reanálises.

Feing and Wang (2019) fizeram uma comparação entre os dados das reanálises MERRA e MERRA2 (Gelaro et al., 2017), validados com dados observados irradiação solar de estações de superfície na China de 1980-2014. Assim como uma avaliação dos dados com cobertura de nuvens e aerossóis. Os resultados foram similares aos encontrados por Boiley and Wald (2018), com uma superestimativa da irradiação solar devido aos problemas de ambas as reanálises de subestimar os valores de nebulosidade, com os maiores vieses na região Sul e os menores valores na região Leste. O MERRA2 apresenta uma redução dos vieses na região Norte, possivelmente devido a assimilação de aerossóis, com melhor performance comparado ao MERRA.

Trabalhos recentes (Sianturi et al., 2020) avaliaram os dados da reanálise MERRA-2, do GMAO/NASA, e do ERA5, do ECMWF como estimativa para dados de Irradiação solar, os quais foram validados com dados observados de irradiância global horizontal obtidas sobre a região da Indonésia. Nestes estudos foi possível observar que em sua grande maioria os dados da reanálise ERA5 apresentam viés positivo, quando comparado aos dados observados de irradiância solar horaria, com os dados do MERRA2 em sua maioria apresentaram viés negativo. Resultados similares foram encontrados para os valores mensais. Em geral as estimativas da ERA5 apresentaram os melhores resultados, quando comparados aos dados observados.

Estudos que relacionam os efeitos dos aerossóis são muito recentes, em um destes trabalhos (Silveira Jr. et al., 2020) foi apresentada a influência dos aerossóis na geração de energia solar, deixando claro o decréscimo na eficiência da geração de energia na presença de aerossóis, principalmente quando é analisado o período de março a outubro quando ocorre a maior carga de aerossóis devido às queimadas que ocorrem na região Norte e Centro-Oeste.

Yamasoe et al. (2021) analisou dados observados de 56 anos (1961-2016), de irradiação solar diária para a cidade de São Paulo, onde observou uma tendência negativa, caracterizando o efeito de escurecimento, com um efeito oposto na fração de cobertura de nuvens. As possíveis causas podem ser associadas com a ocorrência de nevoeiro, efeitos de ilha de calor, variação na carga de aerossóis e aumento na concentração dos gases do efeito estufa.

Herdies et al. (2023) analisaram o desempenho do modelo BAM (Brazilian Global Atmospheric Model), comparando os dados de radiação solar, temperatura (máxima, mínima e média) e vento com dados observados do INMET durante o período de 2017-2021. Os resultados mostraram que em suas diferentes simulações (aerossol constante, climatológico e igual a zero) o modelo BAM superestimou a radiação solar em todo o Brasil, especialmente na Amazônia; subestimou temperatura na maior parte das regiões nordeste, sudeste e sul; e superestimado em partes do norte e centro-oeste; enquanto a velocidade do vento foi superestimada em todas as regiões exceto na região amazônica. Em geral as simulações com aerossol constante apresentaram melhor desempenho que as demais, seguidas por condições climatológicas e zero aerossol. Os índices de destreza utilizados na intercomparação entre o BAM e as observações indicam a necessidade de ajustes e calibrações no modelo BAM para melhor uma melhor representação das variáveis de superfície avaliadas no trabalho.

### **3 DADOS E METODOLOGIA**

Nesta seção, serão apresentados os dados observados e os dados de reanálise que fazem parte da análise de validação do uso de dados de reanálise para estimativa de radiação solar em diferentes regiões do Brasil. Também serão definidos os métodos de avaliação utilizados para essa validação.

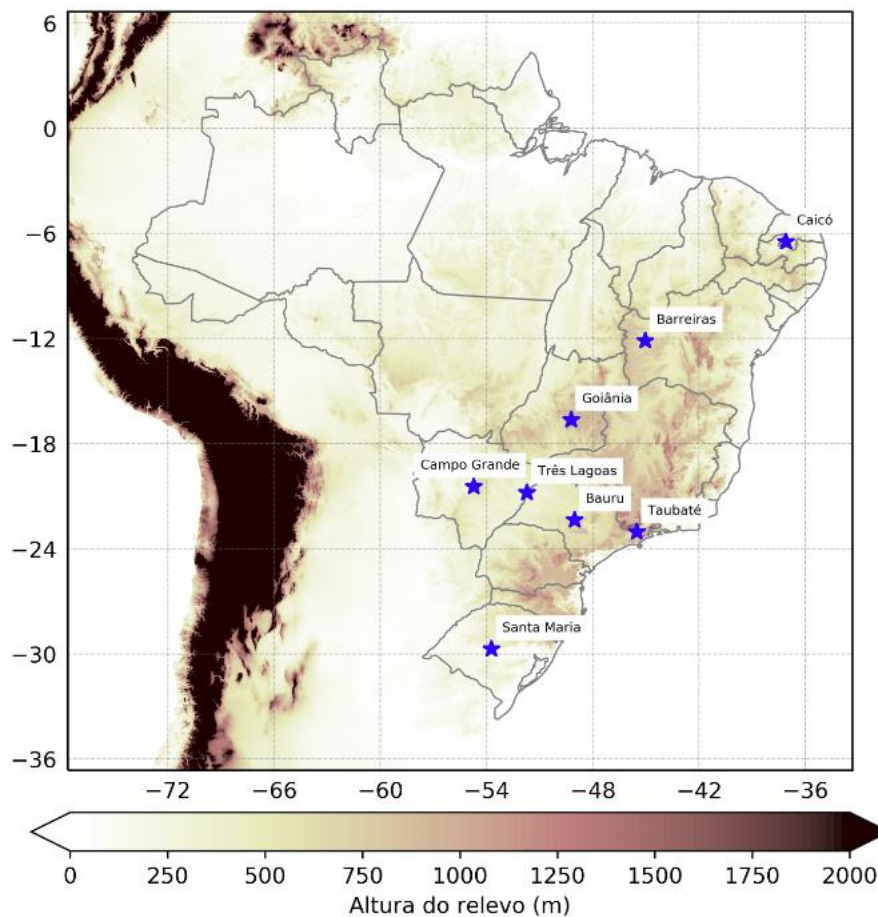
### 3.1 Observações e Conjunto de Dados de Reanálise

O conjunto de dados observados foi ampliado e oito localidades foram escolhidos a partir de estações com medições de radiação solar utilizando dados observacionais (2001-2019) coletados pelo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), sendo que a escolha foi feita de acordo com sua representatividade na posição climática e geográfica do Brasil (Figura 1). A localidade de Caicó, no Estado do Rio Grande do Norte, devido à sua localização próxima ao equador e seu regime de precipitação bem definido, com pouca precipitação durante a maior parte do ano, sendo a máxima no mês de março, com média de 99 mm, e precipitação mínima entre os meses de agosto e novembro, quando o total médio dos quatro meses atinge o acumulado de 12 mm, a média anual é de 377 mm. Campo Grande, no estado de Mato Grosso do Sul, na região mais central da América do Sul (Figura 1), apresenta uma distribuição mais homogênea de precipitação, com máxima em janeiro de 234 mm, e mínima em julho de 30 mm, sendo a média anual de 1573 mm. Taubaté, no estado de São Paulo, está localizada entre as montanhas da Mantiqueira e da Serra do Mar, com precipitação anual média de 1592 mm, com máxima em janeiro de 299 mm e mínima de precipitação em junho, 30 mm. O clima em Barreiras é tropical, com invernos mais secos que os verões. A temperatura média anual é 25.7 °C, e a pluviosidade média anual é de 863 mm. A maior precipitação ocorre em novembro, com uma média de 154 mm, enquanto Julho é o mês mais seco, com 0 mm. O clima em Santa Maria é quente e temperado, com pluviosidade significativa ao longo do ano, mesmo no mês mais seco. A temperatura média é 19.0 °C, e a pluviosidade média anual é de 1838 mm. Agosto é o mês mais seco, com 123 mm, enquanto Outubro é o mais chuvoso, com uma média de 215 mm. Apresentando um clima tropical, Goiânia tem um verão com pluviosidade significativamente maior que o inverno. A temperatura média anual é 23.4 °C, com uma pluviosidade média de 1270 mm. Julho é o mês mais seco, com apenas 2 mm de precipitação, enquanto Janeiro é o mais chuvoso, com uma média de 226 mm. Bauru possui um clima tropical, com verões mais chuvosos que invernos, tem uma pluviosidade média anual de 1357 mm. O verão estende-se de Janeiro a Dezembro. Julho é o mês mais seco, com 30 mm de precipitação, enquanto Janeiro registra a maior precipitação, com média de 259 mm. Três Lagoas possui um clima tropical, caracterizado por verões mais chuvosos que invernos, com uma pluviosidade média anual de

1340 mm. O verão ocorre de Janeiro a Dezembro. Julho é o mês mais seco, com 18 mm de precipitação, enquanto Janeiro registra a maior média, com 240 mm.

As estações foram escolhidas por apresentarem um conjunto com mais de 12 anos de dados (Tabela 1), considerado um conjunto representativo para o presente estudo.

**Figura 1:** Localização das estações utilizadas neste estudo. Estação de Caicó, Campo Grande, Três Lagoas, Taubaté, Bauru, Santa Maria, Barreiras e Goiânia.



**Tabela 2.** Informações sobre as estações meteorológicas.

Estações	Latitude, Longitude e Altitude	Período de dados
Caicó, RN	-6.47; -37.09; 171.3 m	Jan. 2007 até Dez. 2019
Campo Grande, MS	-20.45; -54.72; 528.5 m	Out. 2001 até Dez. 2019

Três Lagoas, MS	-20,79; -51,72; 329 m	Jan. 2002 até Dez. 2018
Taubaté, SP	-23,04; -45,52; 582,3 m	Dez. 2006 até Dez. 2019
Bauru, SP	-22,36; -49,03; 636 m	Jan. 2002 até Dez. 2018
Santa Maria, RS	-29,72; -53,72; 103 m	Jan. 2002 até Dez. 2018
Barreiras, BA	-12,13; -45,03; 474 m	Jan. 2002 até Dez. 2018
Goiânia, GO	-16,64; -49,22; 727 m	Jan, 2002 até Dez. 2018

---

Fonte: Produção do autor.

O conjunto de dados de reanálise utilizado neste estudo é a segunda geração da Análise Retrospectiva para Pesquisa e Aplicações da Era Moderna (MERRA-2) pelo GMAO da NASA (National Aeronautics and Space Administration, Global Modeling and Assimilation Office). Ao contrário de qualquer outra reanálise atmosférica de longo prazo produzida anteriormente, o MERRA-2 inclui campos de aerossol on-line, que interagem com campos de radiação do modelo, ou seja, representando os efeitos diretos e semi-diretos dos aerossóis (Gelaro et al. 2017). A resolução espacial dos dados MERRA-2 é de  $0,5^\circ$ , ou aproximadamente 50 km, com resolução temporal horária. O MERRA-2 inclui a assimilação de dados de aerossóis, na qual observações meteorológicas são assimiladas dentro de um sistema global de assimilação. O sistema usa o GEOS-5 (*Goddard Earth Observing System*, versão 5.12.4) e o sistema de assimilação de dados GSI (*Gridded Statistical Interpolation System*). O modelo inclui o núcleo dinâmico de Volumes Finitos com discretização horizontal na esfera cúbica, com resolução aproximada de  $0,5^\circ \times 0,625^\circ$  e 72 níveis na vertical (Gelaro et al., 2017). As variáveis utilizadas são o Surface Net Downward Shortwave Flux (SWGNT), Surface Net Downward Shortwave Flux assumindo nenhum aerossol (SWGNTCLN), Surface Net Downward Shortwave Flux assumindo céu claro (SWGNTCLR) e o Surface Net Downward Shortwave Flux assumindo céu claro e sem aerossol (SWGNTCLRCLN), e para fins de comparação e avaliar a influencia direta dos aerossóis são utilizados os dados de AOD (Profundidade Óptica dos Aerossóis). O mesmo método de interpolação bilinear é usado para estimar a irradiação solar do MERRA-2 até a localização da estação.

O BAM é uma das versões mais recentes do modelo numérico global do CPTEC/INPE em operação (Figuerola et al., 2016, Herdies et al., 2023) disponíveis em sua versão operacional, e na qual estão sendo realizados testes para a inclusão de dados de aerossóis. O modelo usa uma



representação esférico-harmônica T126L42 (~ 100 km, próximo ao equador) para os campos dinâmicos, com 42 níveis verticais, com resolução temporal de 3 h, e as principais parametrizações utilizadas no modelo são definidas em Figueroa et al., 2016. É importante mencionar a parametrização CLIRAD, modificada por Tarasova e Fomin (2000) para parametrização de radiação, utilizada nesta versão do modelo. Nas simulações do BAM serão considerados os dados sem a influência dos aerossóis (zero aerossol), com aerossóis fixos e com aerossóis climatológicos.

Na análise de desempenho das reanálises e dos dados do modelo BAM serão utilizados os seguintes índices estatísticos: viés médio (equação 1), raiz do erro quadrático médio (equação 2), coeficiente de correlação (equação 3). A partir desses índices serão gerados os diagramas de Taylor para cada localidade. É importante ressaltar que os dados dos modelos serão interpolados para a localidade da estação de superfície, para a avaliação individual.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

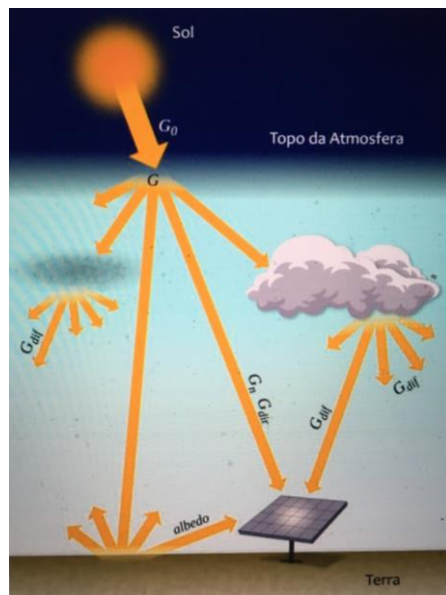
$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \mu)^2}{N}} \quad (2)$$

$$REQM = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (3)$$

Onde x representa a grandeza estimada e y observada, dos dados de irradiação global.

A base de dados do presente projeto será composta de dados de estações meteorológicas de superfície, mais especificamente de dados radiométricos, de irradiação solar, das estações disponíveis nas diversas regiões do Brasil (tabela 1), que tem sua aplicação direta no uso de geração de energia solar (Figura 2).

Figura 2 – Componentes da Irradiância Solar.



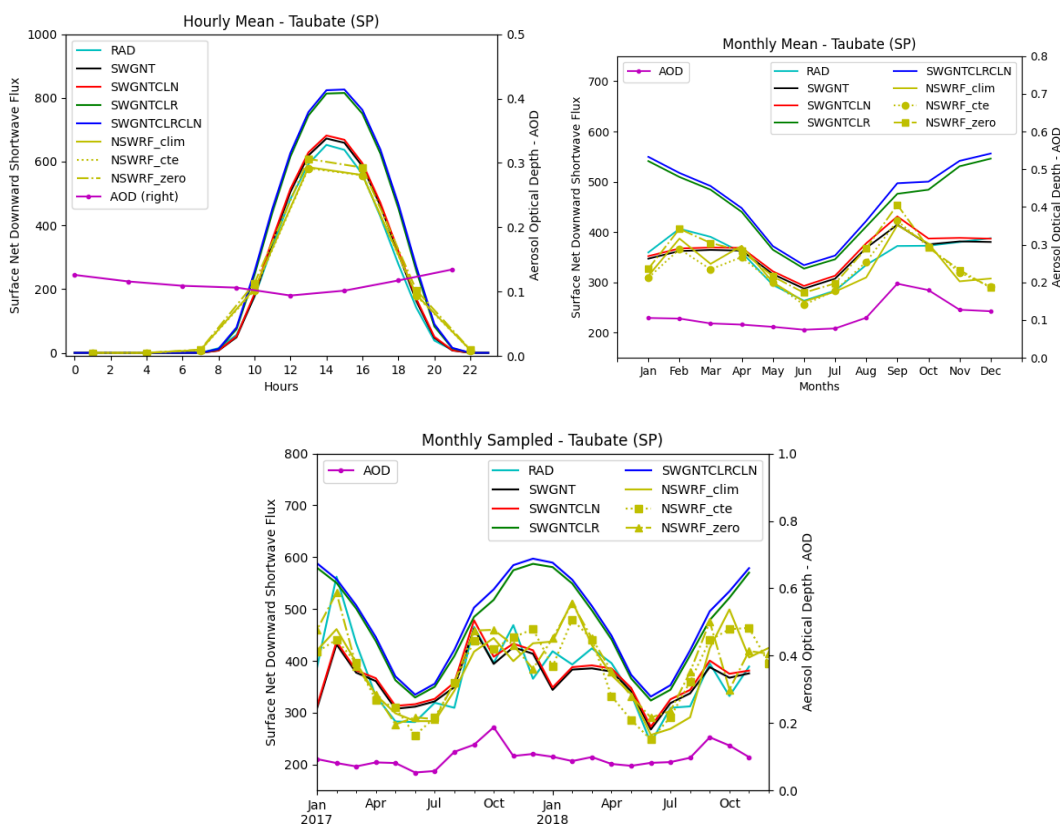
Fonte: Pereira et al., 2017.

#### 4 RESULTADOS

Taubaté apresenta um comportamento clássico onde os resultados da reanálise, considerando céu com nebulosidade e aerossóis está próximo ao observado (SWGNT). No ciclo anual pode ser observado uma leve subestimação durante o mês de fevereiro e uma leve superestimação durante os meses de inverno e primavera. O comportamento do campo de irradiação solar gerado pelo modelo apresenta um comportamento muito semelhante quando é considerado a nebulosidade e aerossol, bem como céu claro e sem aerossol, com as maiores diferenças no mês de setembro, onde o AOD também apresenta um pico, possivelmente associado com as queimadas da região Amazônica. As maiores diferenças são observadas quando é considerado céu claro (SWGNTCLR), isso é sem nenhuma nebulosidade, e céu claro e sem aerossóis (SWGNTCLRCLN). Os resultados do BAM são similares, quando são considerados o aerossol climatológico, constante e zero, onde na média diária e mensal os resultados superestimam a radiação solar, em especial na média mensal, exceto na média diária no horário das 14 h, onde são subestimados.

De acordo com os dados observados, e bem representado pelo modelo BAM (com aerossol constante), durante o mês de fevereiro, a maior quantidade de horas diárias de sol é registrada em Taubaté, em média, e em maio a menor quantidade. A série mensal é melhor representada pelas reanálises do MERRA-2 (SWGNT e SWGNTCLN), onde fica claro que o efeito dos aerossóis não tem um impacto muito grande em Taubaté

Figura 3 - O padrão diurno médio (a) e a média mensal de irradiação solar observada (b) na estação de Taubaté (linha verde claro). As estimativas de irradiação solar da reanálise MERRA-2 são: SWGNT (linha preta), SWGNTCLN (linha vermelha), SWGNTCLR (verde escuro) e SWGNTCLRCLN (linha azul), respectivamente. As estimativas do modelo BAM são: NSWRF\_clim (amarelo contínuo), NSWRF\_cte (amarelo pontilhado) e NSWRF\_zero (amarelo contínuo-pontilhado). A linha rosa representa o AOD (Profundidade Óptica do Aerossol).



Fonte: Produção do autor.

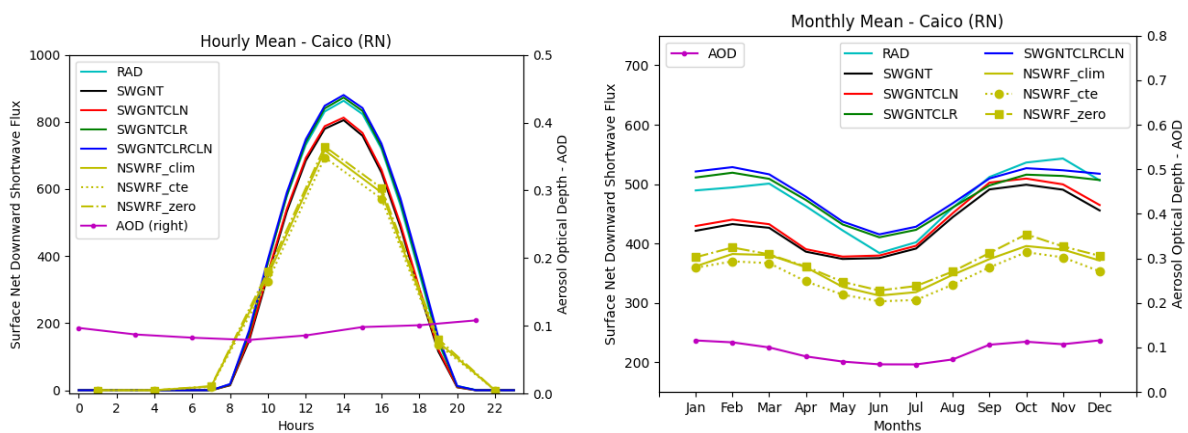
A estação de Caicó se encontra em uma região com um clima quase desértico, a região tem muito pouca nebulosidade e livre dos efeitos da poluição das queimadas. O comportamento diurno da irradiação solar é muito bem representado pelos dados de reanálise de MERRA-2, com um detalhe importante, está bem representado pela irradiação solar do modelo considerando céu claro e céu claro e sem aerossol (SWGNTCLR e SWGNTCLRCLN),

comportamento bem diferente do apresentado pela estação de Taubaté. O modelo quando considera os efeitos de nebulosidade e nebulosidade sem aerossóis (SWGNT e SWGNTCLN) subestima os valores de radiação observada no ciclo diurno. Comportamento similar pode ser observado para as simulações do BAM, o qual leva em consideração apenas as alterações com aerossóis, sem alterar o campo de nebulosidade, subestimando os valores de radiação solar.

No ciclo anual a irradiação solar estimada pelo modelo considerando céu com nebulosidade subestima a irradiação solar observada. É interessante observar que o modelo aproxima os valores na segunda metade do ano, desprezando os efeitos de nebulosidade e de aerossóis, ainda assim subestimando os valores observados no mês de novembro. O BAM não altera seu padrão anual, subestimando durante todo o ano os valores de radiação solar.

Esse comportamento de proximidade dos valores observados com o resultado do modelo considerando céu claro e sem aerossol pode estar associado à baixa precipitação da região, e pouca nebulosidade. Analisando os resultados do modelo, a partir de julho, observa-se a proximidade de todos os valores considerando céu claro, uma vez que é um período muito seco, com precipitações trimestrais abaixo de 15mm.

Figura 4 - O padrão diurno médio (a) e a média mensal de irradiação solar observada (b) sobre a estação de Caicó (linha verde claro). As estimativas de irradiação solar da reanálise MERRA-2 são: SWGNT (linha preta), SWGNTCLN (linha vermelha), SWGNTCLR (verde escuro) e SWGNTCLRCLN (linha azul), respectivamente. As estimativas do modelo BAM são: NSWRF\_clim (amarelo contínuo), NSWRF\_cte (amarelo pontilhado) e NSWRF\_zero (amarelo contínuo-pontilhado). A linha rosa representa o AOD (Profundidade Óptica do Aerossol).

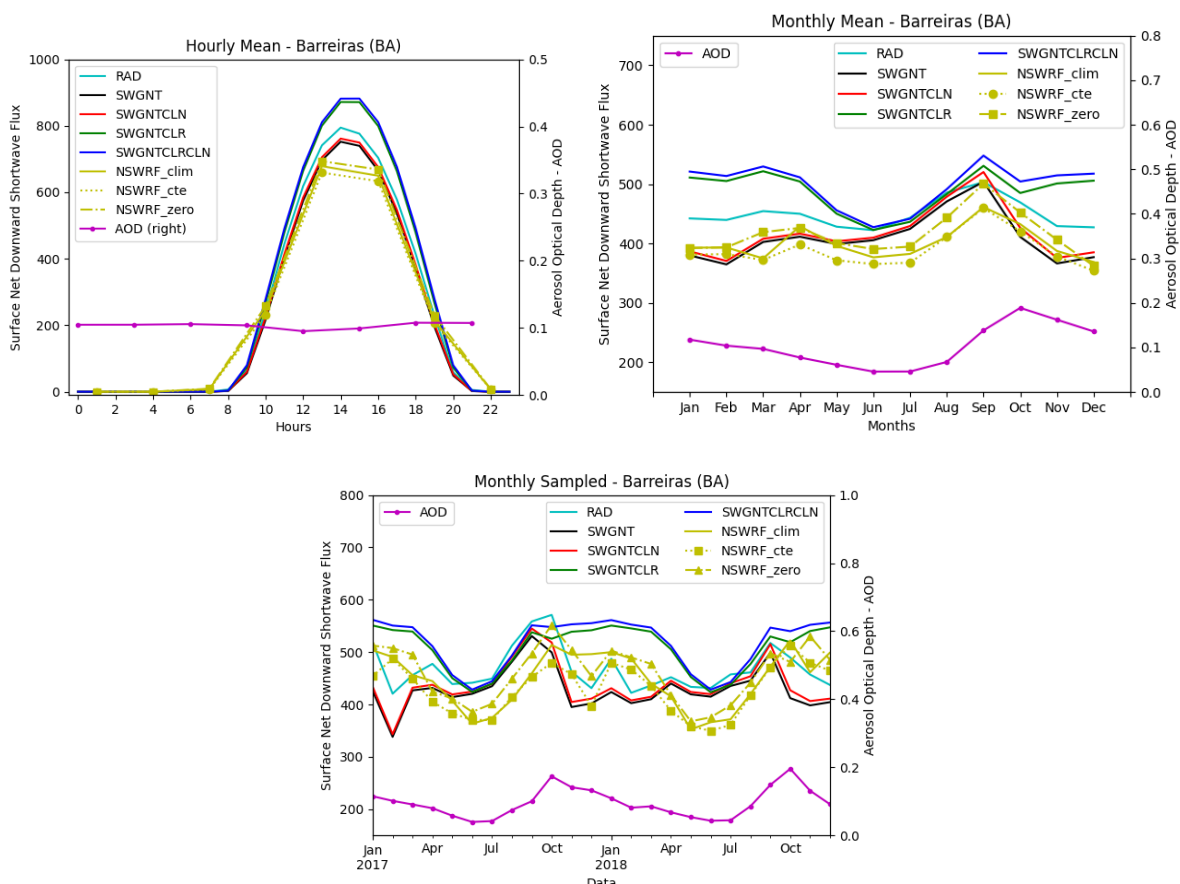


Fonte: Produção do autor.

Barreiras apresenta um comportamento similar ao de Taubaté no ciclo diário e mensal no primeiro semestre. No segundo semestre o comportamento é similar ao de Caicó, onde os valores estão mais próximos em todas as simulações do MERRA-2. O modelo BAM apesar de simular bem o ciclo diário e mensal, subestima em ambas as situações.

Setembro é o mês com mais horas de sol por dia, o que é bem representado em todas as simulações. A série anual é bem representada pelo MERRA-2 e BAM, com uma ligeira subestimação no caso do BAM.

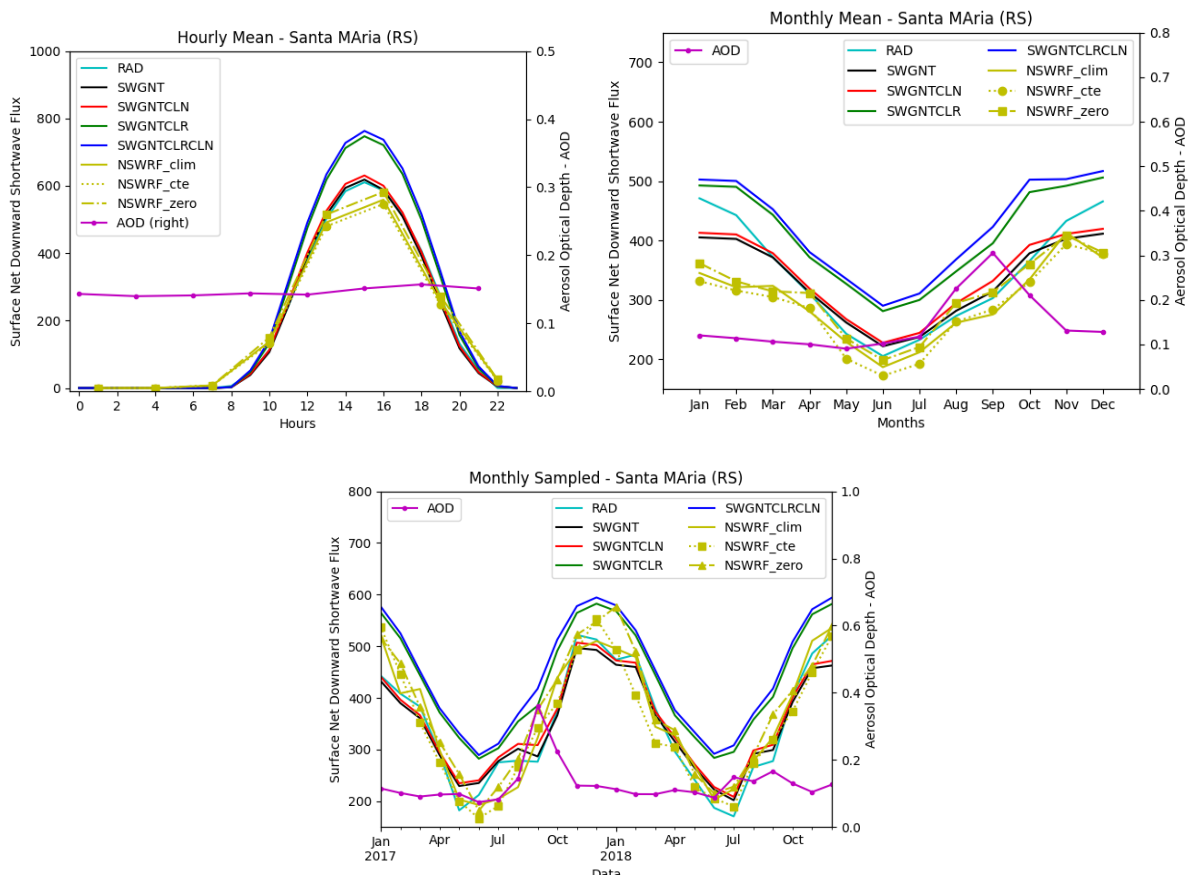
Figura 5 - O padrão diurno médio (a) e a média mensal de irradiação solar observada (b) sobre a estação de Barreiras (linha verde claro). As estimativas de irradiação solar da reanálise MERRA-2 são: SWGNT (linha preta), SWGNTCLN (linha vermelha), SWGNTCLR (verde escuro) e SWGNTCLRCLN (linha azul), respectivamente. As estimativas do modelo BAM são: NSWRF\_clim (amarelo contínuo), NSWRF\_cte (amarelo pontilhado) e NSWRF\_zero (amarelo contínuo-pontilhado). A linha rosa representa o AOD (Profundidade Óptica do Aerossol).



Fonte: Produção do autor.

Santa Maria tem um comportamento similar ao de Taubaté, com um ciclo bem definido durante o ano, e com os melhores resultados para o MERRA-2 que considera a atmosfera com nebulosidade (SWGNT). O efeito dos aerossóis parece não ter muito impacto, visto que o pico de AOD em agosto e setembro não aparece na radiação solar observada, assim como nas simulações dos modelos. Entretanto, é importante ressaltar a presença de um pico de AOD, em setembro de 2017, na série mensal, que aparece claramente na série observada e foi bem representada pelo MERRA-2 (SWGNT e SWGNTCLN), onde é considerado o efeito dos aerossóis. No modelo BAM o efeito do aumento de AOD não foi percebido, por ser constante, zero ou climatológico.

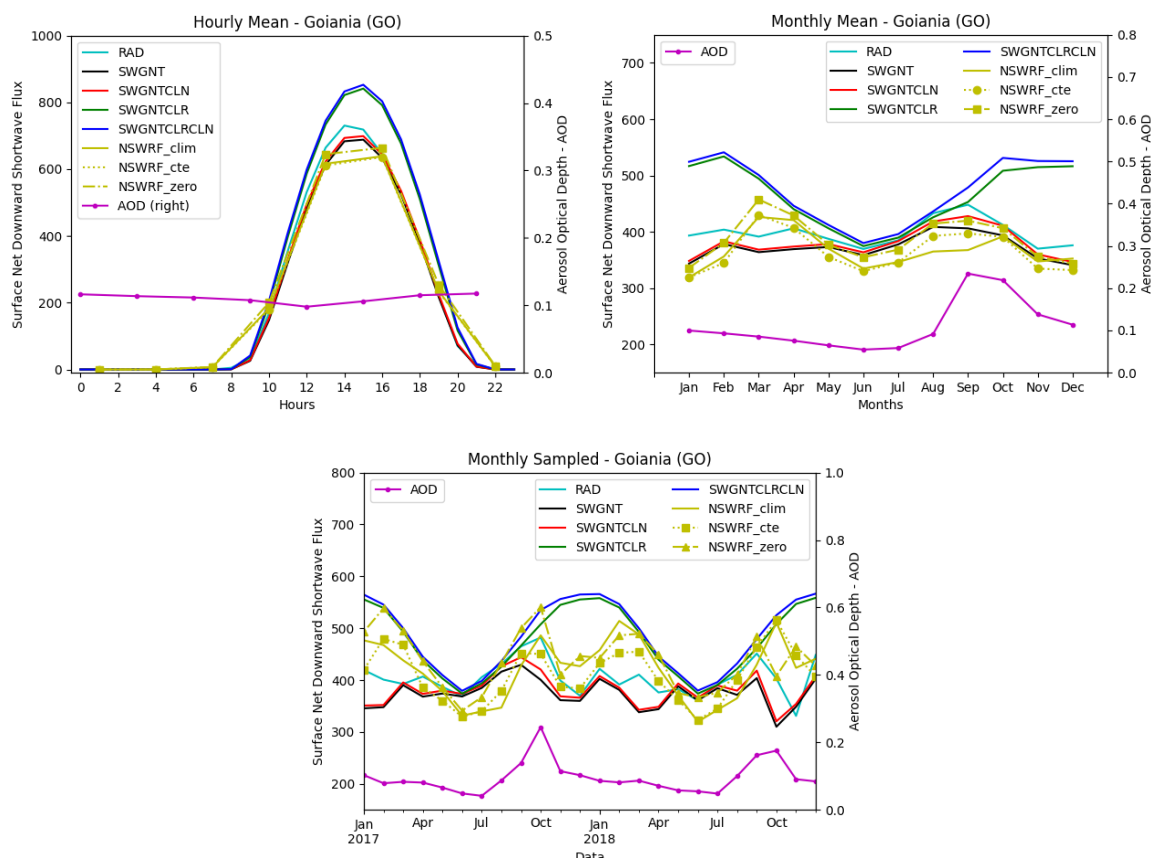
Figura 6 - O padrão diurno médio (a) e a média mensal de irradiação solar observada (b) sobre a estação de Santa Maria (linha verde claro). As estimativas de irradiação solar da reanálise MERRA-2 são: SWGNT (linha preta), SWGNTCLN (linha vermelha), SWGNTCLR (verde escuro) e SWGNTCLRCLN (linha azul), respectivamente. As estimativas do modelo BAM são: NSWRF\_clim (amarelo contínuo), NSWRF\_cte (amarelo pontilhado) e NSWRF\_zero (amarelo contínuo-pontilhado). A linha rosa representa o AOD (Profundidade Óptica do Aerossol).



Fonte: Produção do autor.

Goiânia tem um comportamento similar ao de Barreiras-BA, com um ciclo anual com pequenas variações na radiação solar. Sendo setembro é o mês com mais horas diárias de sol. Os resultados do MERRA-2 representam bem os dados observados quando se considera a nebulosidade e aerossóis (SWGNT e SWGNTCLN). Aparentemente os aerossóis não parecem impactar na quantidade de radiação solar, mesmo os picos na série anual não apresentam um impacto significativo na radiação.

Figura 7 - O padrão diurno médio (a) e a média mensal de irradiação solar observada (b) sobre a estação de Goiânia (linha verde claro). As estimativas de irradiação solar da reanálise MERRA-2 são: SWGNT (linha preta), SWGNTCLN (linha vermelha), SWGNTCLR (verde escuro) e SWGNTCLRCLN (linha azul), respectivamente. As estimativas do modelo BAM são: NSWRF\_clim (amarelo contínuo), NSWRF\_cte (amarelo pontilhado) e NSWRF\_zero (amarelo contínuo-pontilhado). A linha rosa representa o AOD (Profundidade Óptica do Aerossol).

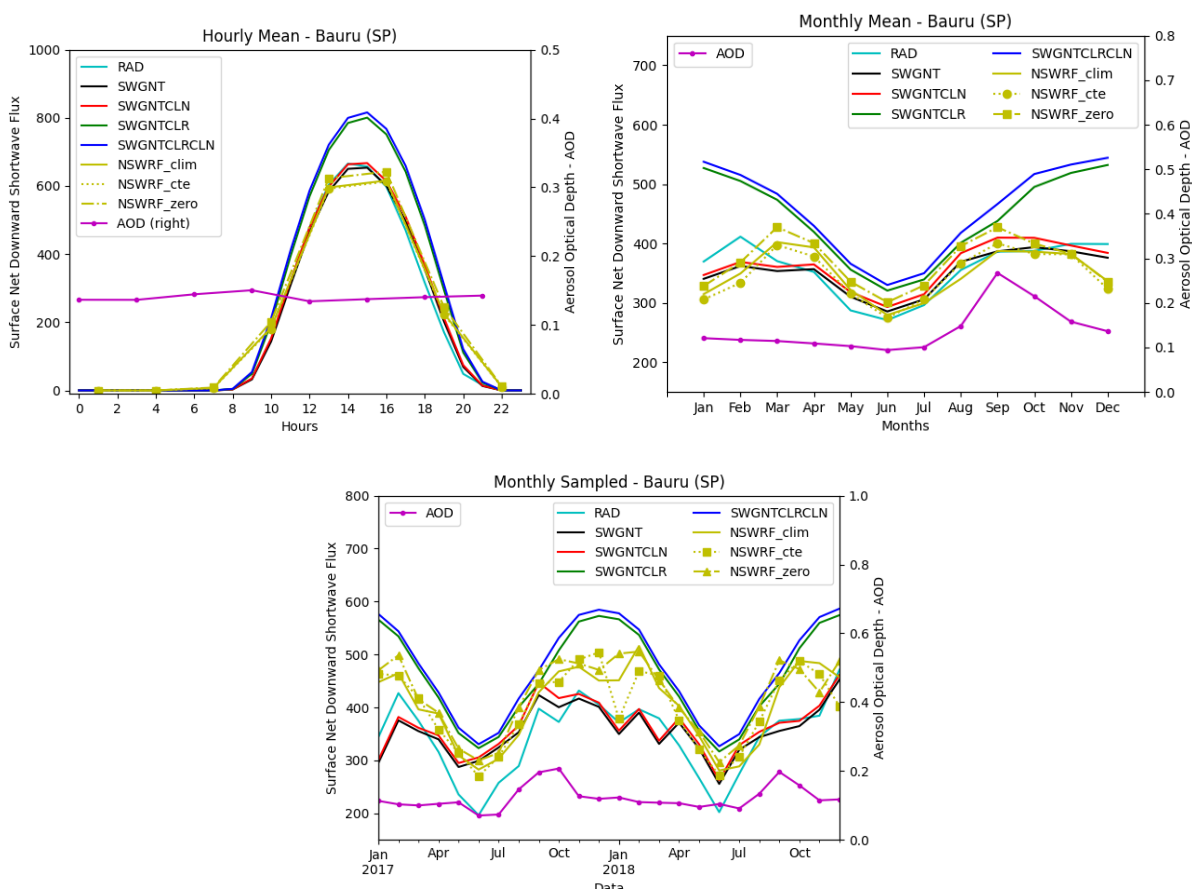


Fonte: Produção do autor.

A estação de Bauru apresenta um comportamento análogo a estação de Santa Maria com relação ao ciclo diurno, com valores observados próximos aos da reanálise do MERRA-2 (SWGNT e SWGNTCLN) que considera os efeitos dos aerossóis e de nebulosidade. Na média mensal, Bauru apresenta um ciclo regular com máximos no verão e mínimos no inverno. Similar ao que ocorreu na estação de Santa Maria, o aumento de AOD resultou em uma queda no campo de radiação solar e o efeito foi observado nos resultados do MERRA-2 que levem em consideração os aerossóis (SWGNT e SWGNTCLN), principalmente em outubro de 2017. Setembro é o mês com mais horas diárias, mas isso não se reflete em maior radiação solar, o que pode ser associado com a carga de aerossóis, pico de AOD, que ocorre neste mês.

Figura 8 - O padrão diurno médio (a) e a média mensal de irradiação solar observada (b) sobre a estação de Bauru (linha verde claro). As estimativas de irradiação solar da reanálise MERRA-2 são: SWGNT (linha preta), SWGNTCLN (linha vermelha), SWGNTCLR (verde escuro) e SWGNTCLRCLN (linha azul), respectivamente. As estimativas do modelo BAM são: NSWRF\_clim (amarelo contínuo), NSWRF\_cte (amarelo pontilhado) e NSWRF\_zero (amarelo contínuo-pontilhado). A linha rosa representa o AOD (Profundidade Óptica do Aerossol).

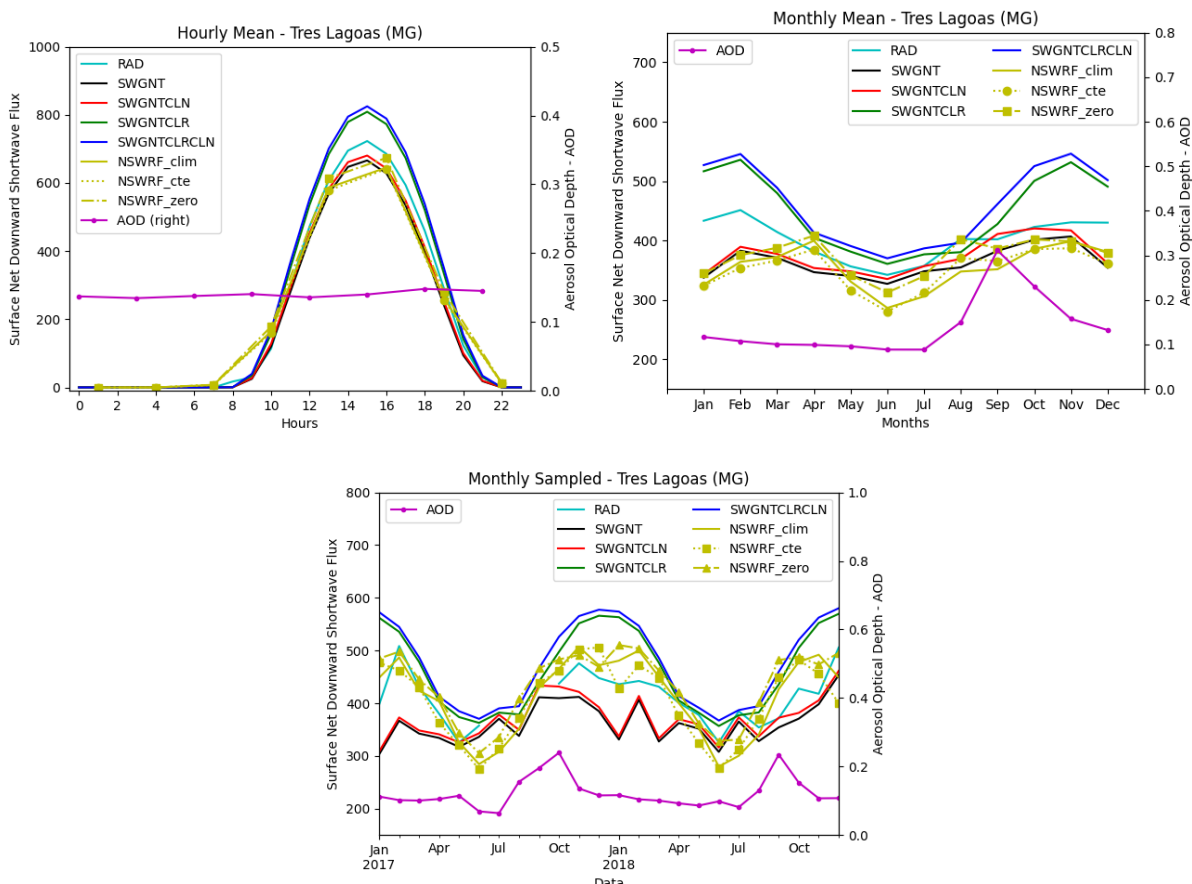




Fonte: Produção do autor.

A estação de Três Lagoas registra em outubro registra o maior número de horas diárias de sol, entretanto, isso não resulta em um alto valor de radiação solar, possivelmente pela influência dos aerossóis, o que pode ser observado nas médias mensais e na série temporal, onde os picos de AOD representam valores baixos de radiação (entre agosto e outubro). Assim como a estação de Campo Grande, Três Lagoas se encontra na região de alta concentração de aerossóis (Figura 1). Os dados do BAM representam razoavelmente o ciclo diário e anual, ainda que subestimem os valores de radiação solar.

Figura 9 - O padrão diurno médio (a) e a média mensal de irradiação solar observada (b) sobre a estação de Três Lagoas (linha verde claro). As estimativas de irradiação solar da reanálise MERRA-2 são: SWGNT (linha preta), SWGNTCLN (linha vermelha), SWGNTCLR (verde escuro) e SWGNTCLRCLN (linha azul), respectivamente. As estimativas do modelo BAM são: NSWRF\_clim (amarelo contínuo), NSWRF\_cte (amarelo pontilhado) e NSWRF\_zero (amarelo contínuo-pontilhado). A linha rosa representa o AOD (Profundidade Óptica do Aerossol).

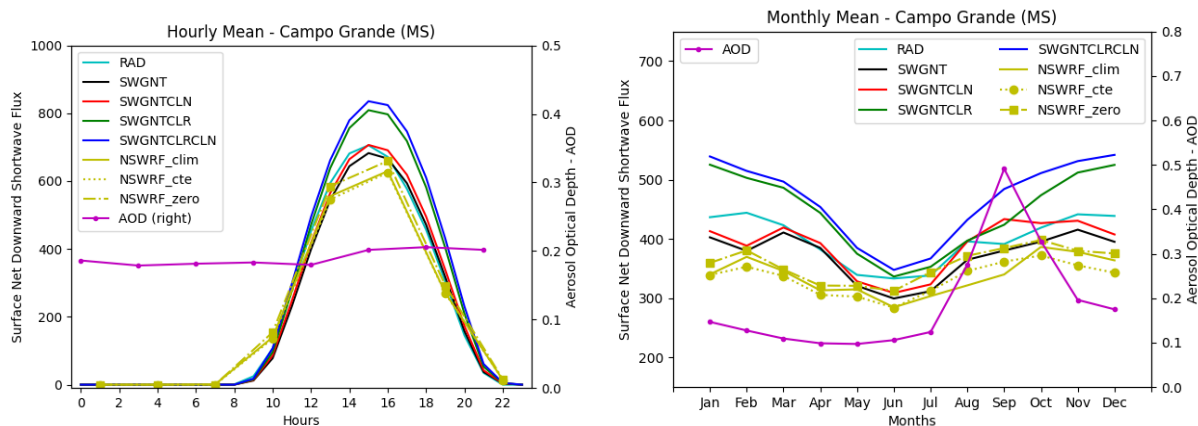


Fonte: Produção do autor.

A estação de Campo Grande tem um ciclo diurno é similar ao de Taubaté, com valores muito próximos aos resultados do modelo considerando céu com nebulosidade, mas sem nenhum aerossol, e distante dos valores que consideram céu claro, sem nebulosidade. No ciclo anual observa-se uma subestimação durante o mês de fevereiro, sem uma possível explicação para essa diminuição nos valores quando considera nebulosidade. Nos meses de maio a julho, onde os resultados do modelo subestimam o valor observado novamente. Uma situação muito interessante ocorre na estação de Campo Grande durante o segundo semestre, onde os valores que não levam em conta os aerossóis ficam mais próximos do que foi observado, mesmo quando se considera céu claro e com aerossóis. Isso se deve ao fato de que essa região é fortemente influenciada pelos incêndios que ocorrem na Amazônia durante os meses de julho, agosto e setembro. Quando se analisam os dados de AOD fica mais clara essa influência, pois os maiores valores de AOD ocorrem nos meses de agosto-outubro, com um pico no mês de setembro, o

qual é inversamente correlacionado com os dados observados de radiação, que sofre uma queda, e sem o efeito dos aerossóis (SWGNTCLN) ocorre um aumento no valores de radiação solar, deixando claro o efeito dos aerossóis no campo de radiação solar. O modelo BAM representa bem o ciclo diário e anual, apesar de subestimar os valores em geral.

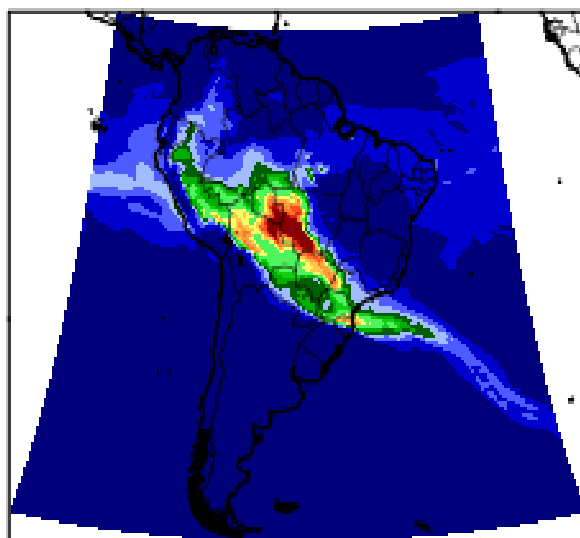
Figura 10 - O padrão diurno médio (a) e a média mensal de irradiação solar observada (b) sobre a estação de Campo Grande (linha verde claro). As estimativas de irradiação solar da reanálise MERRA-2 são: SWGNT (linha preta), SWGNTCLN (linha vermelha), SWGNTCLR (verde escuro) e SWGNTCLRCLN (linha azul), respectivamente. As estimativas do modelo BAM são: NSWRF\_clim (amarelo contínuo), NSWRF\_cte (amarelo pontilhado) e NSWRF\_zero (amarelo contínuo-pontilhado). A linha rosa representa o AOD (Profundidade Óptica do Aerossol).



Fonte: Produção do autor.

É importante ressaltar que a região de Campo Grande (Fig. 11) está sob forte influência da pluma de poluição dos incêndios da região amazônica, que ocorre durante os meses de estiagem (julho, agosto e setembro), influenciando os valores observados da irradiação solar. Esta é a estação onde fica muito claro o impacto dos aerossóis nos resultados do modelo, especialmente na estação seca, com um aumento significativo dos valores de AOD durante os meses de agosto-outubro. Também é possível observar que a pluma de poluição afeta principalmente a região de Mato Grosso e Mato Grosso do Sul.

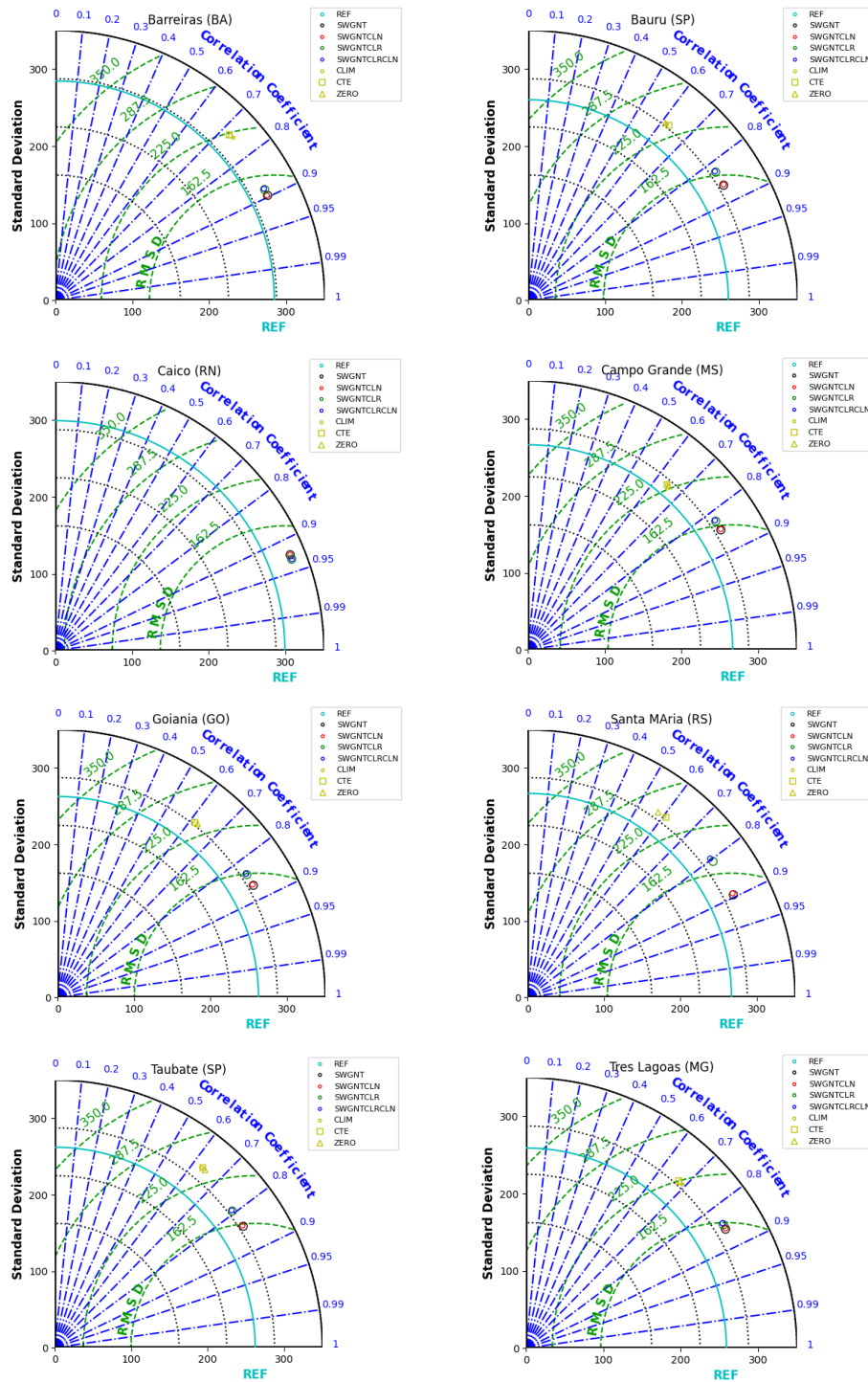
Figura 11 – Pluma de poluição em setembro de 2019.



Fonte: a) Angel et al. 2021 (BAMS).

A Fig. 12 resume os resultados com o diagrama de Taylor, onde se observa que a maior correlação e o menor desvio padrão ocorre para a estação Caicó (Fig. 12c), onde a série que melhor representa os valores observados é a série que considera céu claro e sem aerossol, pois é uma região com menor taxa de precipitação e nebulosidade e com menor volume de aerossóis. Em segundo lugar vem as estações de Santa Maria e Barreiras, com uma boa representação dos valores do MERRA-2 (SWGNT e SWGNTCLN). As estações de Campo Grande, Três Lagoas e Taubaté apresentam valores semelhantes de desvio padrão e coeficiente de correlação, ainda assim acima de 80%, o que é um valor alto.

Figura 12 - Diagramas de Taylor para a correlação média anual e desvio padrão das estações Barreiras, Bauru, Caicó, Campo Grande, Goiânia, Santa Maria, Taubaté e Três Lagoas, utilizando como referência a irradiação solar observada.



Fonte: Produção do autor

## **5 CONCLUSÕES**

Os dados de oito estações foram comparados com estimativas de dados de reanálise do MERRA-2 do modelo BAM, onde a cobertura de nuvens e o efeito dos aerossóis foram levadas em consideração para os dados de reanálise e de aerossóis para o BAM. Observou-se comportamento diferente para as oito estações, sendo que as estações que mais se destacaram foram: Caicó, com baixos índices de precipitação e sem poluição, teve os valores estimados mais próximos de céu claro e sem aerossol. A estação de Taubaté mostrou um comportamento regular com valores próximos ao esperado considerando a influência da nebulosidade. A estação de Campo Grande assim como a de Três Lagoas apresentou um comportamento próximo às duas estações, com períodos de valores próximos ao esperado, quando se considera céu com nebulosidade também, e um segundo período com comportamento mais próximo aos dados com céu claro, devido à influência das queimadas na região da Amazônia.

O objetivo do estudo mencionado foi alcançado ao analisar informações que permitiram avaliar e descrever a variabilidade temporal da irradiação solar em várias regiões do Brasil, utilizando dados de reanálises atmosféricas do MERRA-2 e do modelo BAM. O estudo também demonstrou que ambos os sistemas incorporaram os efeitos dos aerossóis em sua configuração. Além disso, a validação do estudo foi realizada com sucesso por meio do uso de dados observados de radiação em superfície.

Portanto, existem algumas diferenças da irradiação solar observada com os dados de reanálise, o que geralmente é causado pela falta de capacidade dos modelos em representar a fração de nuvens e aerossóis atmosféricos. O modelo BAM apesar de ser mais simplificado e não ter a componente de assimilação de aerossóis apresentou um desempenho satisfatório e com certeza pode ser ajustado para representar melhor os campos de radiação solar.

### **1. ETAPAS FUTURAS**

Durante a próxima fase do presente projeto será dada continuidade à validação dos dados de reanálise MERRA-2, de acordo com as seguintes etapas:

- Seleção de estações meteorológicas em todas as regiões do Brasil para ter uma melhor visualização da influência dos aerossóis e da nebulosidade;
- Análise dos resultados;
- Publicação dos resultados em periódicos internacionais;

## 6 Referências bibliográficas

- Boilley, A., Wald, L., 2015. Comparison between meteorological re-analyses from ERA-Interim and MERRA and measurements of daily solar irradiation at surface. *Renewable Energy* 75(Supplement C), 135-143.
- Feng, F. and Wang, K.C. (2018) Merging satellite retrievals and reanalyses to produce global long-term and consistent surface incident solar radiation datasets. *Remote Sensing*, 10, 115.
- Figueroa, S. N.; and Co-Authors. The Brazilian Global Atmospheric Model (BAM): Performance for Tropical Rainfall Forecasting and Sensitivity to Convective Scheme and Horizontal Resolution. *Weather and Forecasting*, v. 31, p. 1547-1572, 2016.
- Gelaro, R., and Coauthors, 2017: The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2). *J. Climate*, **30**, 5419–5454, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0758.1>.
- Herdies, B. R.; Vendrasco, E. P. ; Quadro, M. F. L. ; Herdies, D. L. . Validação do Potencial Uso de Dados de Reanálises Atmosféricas para Estimativas de Radiação Solar Considerando o Efeito dos Aerossóis. In: Simpósio em Clima, Água, Energia e Alimentos - SIMCLEA, 2021, Florianópolis, SC. Anais do Simpósio em Clima, Água, Energia e Alimentos, 2021.
- Herdies, B. R.; Vendrasco, E. P.; Quadro, M. F. L. ; Herdies, G. R. ; Herdies, D. L. . Validation of the Potential Use of Atmospheric Reanalysis Data to Estimate Solar Irradiation. In: 3rd Euro-Mediterranean Conference for Environmental Integration, 2021, Sousse. The proceedings of 3rd tEuro-Mediterranean Conference for Environmental Integration. Switzerland AG: Springer Nature, 2021.
- Herdies, D.L.; Silva, F.D.d.S.; Gomes, H.B.; Silva, M.C.L.d.; Gomes, H.B.; Costa, R.L.; Lins, M.C.C.; Reis, J.S.d.; Kubota, P.Y.; Souza, D.C.d.; et al. Evaluation of Surface Data Simulation Performance with the Brazilian Global Atmospheric Model (BAM). *Atmosphere* 2023, 14, 125. <https://doi.org/10.3390/atmos14010125>
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P et al (2019) Global reanalysis: goodbye ERA-Interim, hello ERA5. *ECMWF Newsl* 159:17–24. <https://doi.org/10.21957/vf291hehd7>.
- Martins, F.R., Pereira,E.B., Abreu, S.L. Satellite-derived solar resource maps for Brazil under SWERA Project. *Solar Energy*, Phoenix v.81, p.517-528, 2007.
- Pereira, E.B.; Abreu, S.L.; Stuhlmann, R.R.; Colle, S. Survey of The Incident Solar Radiation in Brazil by use of Meteosat Satellite Data. *Solar Energy*, Inglaterra, v. 57, n.2, p. 125-132, 1996.



Pereira, et.al. Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2.a Edição, 2017.

Sianturi, Y.; Marjuki, and Sartika, K. Evaluation of ERA5 and MERRA2 reanalyses to estimate solar irradiance using ground observations over Indonesia region. AIP Conference Proceedings 2223, 020002 (2020); <https://doi.org/10.1063/5.0000854>

Silveira Júnior, C. R., Luiz, G. C., Barbosa, G. A. S., and Sousa, L. G. C.: Aerosol Influence on Photovoltaic Solar Energy Generation for the State of Goiás (Brazil), Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLII-3/W12-2020, 413–418, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-W12-2020-413-2020>, 2020.

Tahir, Z.; M. Ali, S. Ahmad, M. Asim, N. Hayat, M. Azhar, and A. Hussain, “Evaluation of Solar Radiation from MERRA, MERRA-2, ERA-Interim and CFSR Reanalysis Datasets Against Surface Observations for Multan, Pakistan,” in *12th International Conference Solar Energy for Buildings and Industry*, EuroSun 2018 Conference Proceedings, (International Solar Energy Society, Freiburg im Breisgau, Germany, 2018).

Yamasoe, M. A., Rosário, N. M. E., Almeida, S. N. S. M., and Wild, M.: Fifty-six years of surface solar radiation and sunshine duration over São Paulo, Brazil: 1961–2016, Atmos. Chem. Phys., 21, 6593–6603, <https://doi.org/10.5194/acp-21-6593-2021>, 2021.

Tarasova, T. A. and B. A. Fomin. Solar Radiation Absorption due to Water Vapor: Advanced Broadband Parameterizations. Journal of Applied Meteorology. V. 39, p. 1947-1951, 2000.

Tiba, C. Atlas Solarimétrico do Brasil. Recife. UFPE, 2000, 111p.