



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS  
PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

TAIANE ALVES DA SILVA

ANÁLISE DA VARIABILIDADE DA RADIAÇÃO SOLAR EM ALAGOAS  
DURANTE EVENTOS EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO UTILIZANDO O  
MODELO WRF-SOLAR

Maceió - AL

2025

TAIANE ALVES DA SILVA

ANÁLISE DA VARIABILIDADE DA RADIAÇÃO SOLAR EM ALAGOAS  
DURANTE EVENTOS EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO UTILIZANDO O  
MODELO WRF-SOLAR

Dissertação apresentada ao colegiado de  
Pós-Graduação em Meteorologia do Instituto  
de Ciências Atmosféricas (ICAT) da  
Universidade Federal de Alagoas (UFAL),  
como parte dos requisitos para obtenção do  
grau de Mestre em Meteorologia.

Orientador: Prof. Dr. Rosiberto Salustiano

Maceió - AL

2025

**Catálogo na fonte**  
**Universidade Federal de Alagoas**  
**Biblioteca Central**  
**Divisão de Tratamento Técnico**

Bibliotecária: Helena Cristina Pimentel do Vale – CRB4 - 661

- S586a Silva, Taiane Alves da.  
Análise da variabilidade da radiação solar em Alagoas durante eventos extremos de precipitação utilizando o modelo WRF-Solar / Taiane Alves da Silva. – 2025.  
71 f.: il.
- Orientador: Rosiberto Salustiano da Silva Júnior.  
Coorientador: Diogo Nunes da Silva Ramos.  
Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas, Instituto de Ciências Atmosféricas. Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Maceió, 2025.
- Bibliografia: f. 61-71.
1. Radiação solar – Alagoas, Brasil. 2. Índices pluviométricos. 3. Modelos Atmosféricos. I. Título.

CDU: 551.5(813.5)


## Folha de Aprovação

**“ANÁLISE DA VARIABILIDADE DA RADIAÇÃO SOLAR EM ALAGOAS DURANTE  
EVENTOS EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO UTILIZANDO O MODELO WRF-SOLAR.”**

***TALANE ALVES DA SILVA***

Dissertação submetida ao colegiado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Alagoas - UFAL, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Meteorologia.

Aprovado pela Banca Examinadora composta por:

Documento assinado digitalmente  
 **ROSIBERTO SALUSTIANO DA SILVA JÚNIOR**  
Data: 21/02/2025 12:57:39-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---


**Prof. Dr. Rosiberto Salustiano da Silva Júnior**  
(Orientador)

Assinado digitalmente por:  
Diogo Nunes da Silva Ramos  
CPF: \*\*\*.300.584-\*\*  
Certificado emitido por Ac Senai Bahia  
Data: 22/02/2025 16:09:48 -03:00




---

**Prof. Dr. Diogo Nunes da Silva Ramos**  
(Coorientador)

Documento assinado digitalmente  
 **JOSE FRANCISCO DE OLIVEIRA JÚNIOR**  
Data: 22/02/2025 10:58:21-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

**Prof. Dr. José Francisco de Oliveira Júnior**  
(Membro Externo)

Documento assinado digitalmente  
 **ANTONIO MARCOS DELFINO DE ANDRADE**  
Data: 22/02/2025 15:43:18-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

**Prof. Dr. Antônio Marcos Delfino de Andrade**  
(Membro Externo)

**FEVEREIRO/2025**

Dedico este trabalho aos meus pais que  
sempre me apoiaram e toda minha família.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço a Deus por me conceder saúde, força e sabedoria para superar os desafios ao longo dessa jornada acadêmica.

Aos meus pais, Maria e Tadeu, pelo amor, apoio incondicional e por sempre acreditarem em mim, mesmo nos momentos mais difíceis. Vocês são minha base e minha maior motivação. Às minhas irmãs, Ane, Marte e Helen, que sempre estiveram ao meu lado, o apoio de vocês foi essencial para a minha jornada. Ao Renilson Almeida e à Katyelle Ferreira, que acreditaram em mim mesmo quando eu não acreditava: obrigada por todo o suporte e pelas palavras de incentivo.

Ao meu orientador, Dr. Rosiberto Salustiano e ao Dr. Diogo Ramos, pela paciência, orientação, dedicação e pelos ensinamentos valiosos que me guiaram ao longo deste trabalho, suas contribuições, experiências e encorajamento, foram essenciais para que eu chegasse até aqui.

Aos colegas do laboratório, pela amizade, troca de conhecimento e apoio mútuo ao longo desse período. A convivência com vocês tornou essa caminhada mais leve e enriquecedora. Aos meus amigos, que me ensinaram que, em meio às dificuldades e turbulências, podemos ser mais fortes.

Ao professor Dr. Antônio Marcos D. Andrade, por todo suporte e encorajamento, que me fizeram sair da minha zona de conforto. Sem seus conselhos, não teria dado certo. E a todos os demais professores que contribuíram, de alguma forma, para a minha formação.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), pelo apoio financeiro concedido por meio da bolsa de estudos, que foi fundamental para a realização deste trabalho.

Por fim, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para que esta dissertação fosse concluída: meu sincero agradecimento.

## RESUMO

A energia solar desempenha um papel fundamental no planejamento de sistemas fotovoltaicos e é uma solução promissora para atender às metas globais de sustentabilidade. Em Alagoas, o elevado potencial solarimétrico contrasta com desafios climáticos significativos, como chuvas intensas e secas severas, o que destaca a necessidade de estudos detalhados para orientar decisões sobre a geração de energia renovável. Este estudo avaliou a variabilidade da radiação solar em Alagoas em anos com altos índices pluviométricos, utilizando o modelo WRF-Solar. A região de estudo abrange o Estado de Alagoas, e para a simulação foram utilizados dados de reanálise do ERA-5. Durante as simulações, foram analisadas duas configurações do modelo: com perturbação estocástica (WS-C1) e parametrização de Deng (WS-C2), com resolução de 5 km, grade de 101x101 e duração de 24 horas. Para validação, foram utilizados dados de radiação da base do INMET e de precipitação do MERGE. Os resultados indicaram que a configuração WS-C2, com o esquema de nuvens híbridas (representação de nuvens rasas e profundas) de Deng ativado, apresentou maior precisão na representação da variabilidade espacial e temporal da irradiância global horizontal, especialmente na região litorânea. Durante o ano de 2022, observou-se uma redução média de 15% na irradiância solar em relação a 2023. A correlação obtida foi de  $r = 0,74$  (Litoral),  $r = 0,80$  (Palmeira dos Índios) e  $r = 0,86$  (Pão de Açúcar). O Sertão foi identificado como a região com maior potencial solarimétrico, registrando uma média anual de 6,5 kWh/m<sup>2</sup>.d. Os resultados obtidos não apenas auxiliam no dimensionamento e na localização de sistemas fotovoltaicos em Alagoas, mas também fornecem subsídios valiosos para a expansão da geração de energia renovável, promovendo a sustentabilidade energética em uma região sensível a variações climáticas.

**Palavras-chave:** Radiação Solar, Índices Pluviométricos, Modelos Atmosféricos

## ABSTRACT

Solar energy plays a fundamental role in the planning of photovoltaic systems and is a promising solution to meet global sustainability goals. In Alagoas, the high solar potential contrasts with significant climatic challenges, such as intense rainfall and severe droughts, highlighting the need for detailed studies to guide decisions on renewable energy generation. This study evaluated the variability of solar radiation in Alagoas during years with high precipitation indexes, using the WRF-Solar model. The study area covers the state of Alagoas, and ERA-5 reanalysis data were used for the simulation. Two model configurations were analyzed during the simulations: with stochastic perturbation (WS-C1) and Deng's parameterization (WS-C2), with a 5 km resolution, a 101x101 grid, and a duration of 24 hours. For validation, radiation data from the INMET database and precipitation data from MERGE were used. The results indicated that the WS-C2 configuration, with the hybrid cloud scheme (representation of shallow and deep clouds) of Deng activated, showed greater accuracy in representing the spatial and temporal variability of global horizontal irradiance, especially in the coastal region. In 2022, an average reduction of 15% in solar irradiance was observed compared to 2023. The correlation obtained was  $r = 0.74$  (Coast),  $r = 0.80$  (Palmeira dos Índios), and  $r = 0.86$  (Pão de Açúcar). The Sertão region was identified as the area with the highest solar potential, recording an annual average of 6.5 kWh/m<sup>2</sup>.d. The results obtained not only assist in the sizing and location of photovoltaic systems in Alagoas, but also provide valuable insights for the expansion of renewable energy generation, promoting energy sustainability in a region sensitive to climatic variations.

**Keywords:** Solar Radiation, Precipitation Indices, Atmospheric Models



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Potencial de Energia Solar no Mundo .....	14
Figura 2 - Evolução da capacidade instalada de geração de energia solar no Brasil (MW) ....	16
Figura 3 - Interações do sistema nuvem-aerossol-irradiação .....	25
Figura 4 - Esquema simplificado da arquitetura do modelo WRF .....	26
Figura 5 - Localização da área de estudo, em destaque Estado de Alagoas, as estações meteorológicas demarcadas por pontos .....	34
Figura 6 - Configuração de grade usada para simulações do WRF-Solar: Domínio 1 apresentando resolução horizontal de 20 km e domínios 2, com resolução de 5 km .....	34
Figura 7 - Regime de precipitação mensal nas cidades de Maceió (a), Palmeira dos Índios (b) e Pão de Açúcar (c), com as normais climatológicas (INMET 1991-2020), dados de 2022 e 2023, incluindo informações do MERGE .....	43
Figura 8 - Variação do Índice Ocenânico Niño (ONI) e fases do ENOS nos últimos 25 anos.	44
Figura 9 - Média anual da nebulosidade para o Estado de Alagoas, satélite GOES16, para os anos de 2022 (a) e 2023 (b) .....	46
Figura 10 - Precipitação acumulada anual (mm) obtida com dados MERGE (a,b) e WRF-Solar (c,d) para os anos de 2022 e 2023 .....	47
Figura 11 - Precipitação média acumulada anual (mm) para os anos de 2022 e 2023 proveniente do MERGE (a) e WRF-Solar (b) .....	48
Figura 12 - Comparação entre os resultados da simulação de Irradiação utilizando as configurações C1 e C2 do WRF-Solar .....	54
Figura 13 - Irradiância solar diária em Alagoas para os anos de 2022 (a) e 2023 (b) .....	55
Figura 14 - Média da irradiância solar diária em Alagoas para o período de 2022 a 2023 .....	56
Figura 15 - Distribuição espacial da irradiação solar em Alagoas durante as diferentes estações do ano: (a) verão, (b) outono, (c) inverno, (d) primavera .....	58

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Detalhes das simulações especificando os parâmetros físicas e os esquemas utilizados .....	36
Tabela 2 - Filtro para dados de Irradiância Solar com base no angulo zenital .....	37
Tabela 3 - Avaliação das simulações realizadas com o WRF-Solar, apresentando as Médias ( $\mu$ ) e Desvios Padrão ( $\sigma$ ) para a variável Radiação Solar em diferentes regiões de Alagoas, considerando as configurações WS-C1 e WS-C2 (WRF-Solar + configuração utilizada) e os dados observacionais do INMET .....	51
Tabela 4 - Comparação do desempenho das configurações C1 e C2 do WRF-Solar na simulação de radiação utilizando diferentes métricas estatística (r, REQM, Viés e EMA)b ...	52

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	12
2	<b>OBJETIVOS</b> .....	13
2.1	Objetivo geral.....	13
2.2	Objetivo específico.....	13
3	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	13
3.1	Estimativa da produção de energia fotovoltaica.....	13
3.2	Panorama da Energia Solar no Brasil e no Mundo.....	13
3.2.1	No Mundo.....	13
3.2.2	No Brasil.....	14
3.3	Eventos extremos e seus impactos.....	17
3.4	Modelos Numéricos de Mesoescala: O Modelo WRF/WRF-Solar.....	21
3.5	Breve Revisão Bibliográfica do WRF-Solar.....	31
4	<b>METODOLOGIA</b> .....	33
4.1	Caracterização da Área de estudo.....	34
4.2	Descrição do modelo utilizado.....	34
4.3	Dados observados e instrumentação utilizada.....	38
4.4	Dados de precipitação base MERGE.....	38
4.5	Dados de Satélite do GOES-16.....	39
4.6	Métricas estatísticas utilizadas.....	39
5	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	42
5.1	Validação do Modelo WRF-Solar e Mapeamento Solarimétrico de Alagoas .....	50
6	<b>CONCLUSÃO</b> .....	59
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	61

## 1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por fontes de energia renováveis, aliada à busca por maior sustentabilidade no setor energético, tem intensificado os estudos sobre o potencial solar em diversas regiões do mundo. A energia solar é considerada uma das soluções mais promissoras para atender às metas globais de redução de emissões de gases de efeito estufa, tendo apresentado crescimento significativo nos últimos anos (REN21, 2021; IEA, 2022).

O Estado de Alagoas, localizado na região Nordeste do Brasil, destaca-se por suas características climáticas, como uma elevada insolação anual e um regime de precipitação altamente variável (Reboita et al., 2010; Pereira et al., 2017; Da Silva et al., 2019). Essas condições tornam a região altamente estratégica para o desenvolvimento de projetos de energia solar, pois a alta disponibilidade de radiação solar ao longo do ano favorece a eficiência na geração de energia, enquanto a variabilidade pluviométrica oferece uma oportunidade para mitigar os impactos de períodos de seca com a continuidade da produção energética solar.

No entanto, Alagoas tem enfrentado eventos climáticos extremos ao longo dos anos, seja por secas severas ou chuvas intensas como as que ocorreram nos anos de 1988, 1989 e 2010, que impactaram significativamente as infraestruturas urbanas e rurais, causando desabamentos, interrupção de serviços públicos e o deslocamento de populações (Cavalcante e Silva, 2021). Além disso, o ano de 2022 foi marcado por um dos períodos mais chuvosos já registrados na história do Estado, o que pode ter comprometido a eficiência da geração de energia solar em diversas áreas. Eventos extremos de precipitação, frequentemente associados a sistemas atmosféricos de diferentes escalas, como Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN), Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOL), Brisas Marítimas e ventos alísios, podem impactar significativamente a radiação solar incidente e comprometer a eficiência dos sistemas fotovoltaicos (Lima et al., 2016; Gomes et al., 2019; Reis et al., 2021).

Neste contexto, o modelo de previsão de tempo e clima WRF-Solar (Weather Research and Forecasting Model – Solar) se apresenta como uma ferramenta amplamente utilizada para simulações atmosféricas detalhadas, demonstrando alto desempenho na previsão de radiação solar. O modelo integra parametrizações avançadas que consideram fatores locais, como nebulosidade e aerossóis, permitindo uma avaliação precisa das condições de radiação solar em cenários climáticos diversos (Jiménez et al., 2016; Gueymard et al., 2019). Estudos anteriores validaram sua aplicação em regiões tropicais, destacando sua

robustez na previsão de variáveis meteorológicas que afetam a geração de energia solar (Lee et al., 2020). O estudo de Lima et al. (2025) avaliou a previsão de irradiação global horizontal utilizando os modelos WRF-Solar e GFS-MOS em diversas estações do Nordeste do Brasil, com foco em horizontes de previsão de curto, médio e longo prazo.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral:**

Avaliar a variabilidade da irradiação global horizontal em Alagoas em anos com altos índices pluviométricos, utilizando o modelo WRF-Solar.

### **2.2 Objetivos Específicos:**

1. Analisar as variações temporais da irradiação global horizontal;
2. Avaliar a sensibilidade do modelo em simular a variabilidade da radiação solar durante eventos extremos de precipitação;
3. Identificar as regiões mais vulneráveis à redução do potencial solar.

## **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **3.1 Estimativa da produção de energia fotovoltaica**

A estimativa da produção de energia fotovoltaica é fundamental para o dimensionamento e operação de sistemas solares. A maior parte dos modelos meteorológicos fornece previsões de irradiância global horizontal (GHI - em inglês *Global Horizontal Irradiation*), que é importante para os cálculos de irradiância, mas não captura a radiação que incide diretamente sobre os módulos inclinados.

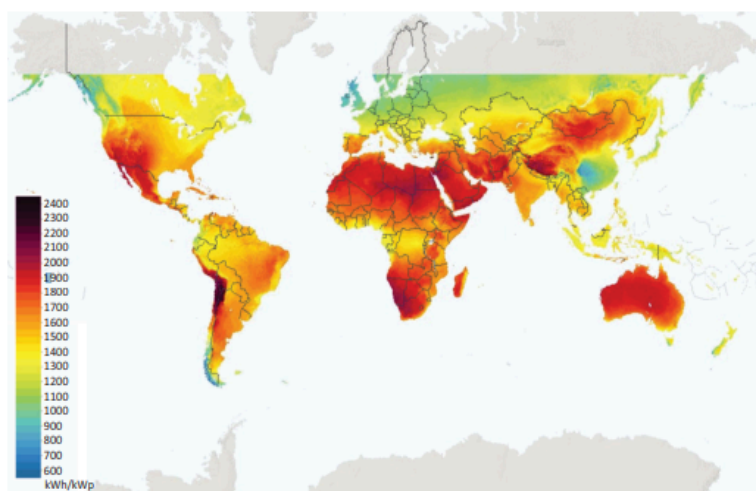
Para estimar a produção de energia, são utilizados modelos que relacionam a irradiância incidente, a temperatura do módulo e outras variáveis como a velocidade do vento com a corrente elétrica gerada. A conversão das condições ambientais em estimativas de produção de energia depende das características do módulo, de sua instalação e da condição de operação.

### **3.2 Panorama da Energia Solar no Brasil e no Mundo**

#### **3.2.1 No Mundo**

A energia proveniente do Sol atinge a superfície terrestre de maneira não uniforme, influenciada por vários fatores, como latitude, estação do ano e condições atmosféricas. O Atlas Solar Global, disponibilizado pelo *World Bank Group* (2023), apresenta o mapa da radiação solar na superfície da Terra, possibilitando conhecer as regiões que possuem o maior potencial de geração fotovoltaica (Bezerra, 2023). A Figura 1 ilustra a distribuição da incidência solar na superfície da Terra.

**Figura 1** - Potencial de Energia Solar no Mundo



**Fonte:** *World Bank Group*. Adaptado por Bezerra, 2023.

A disponibilidade de energia solar na superfície terrestre supera significativamente a demanda global de energia elétrica. Com o avanço das tecnologias que aproveitam a energia solar, tornando-se cada vez mais competitivas em comparação com outras opções, espera-se que a participação dessa fonte na matriz elétrica aumente. Esse crescimento já está ocorrendo em vários países, incluindo o Brasil.

### 3.2.2 No Brasil

A capacidade instalada de geração de energia elétrica no Brasil tem apresentado um crescimento significativo nos últimos anos. A matriz de geração de energia elétrica no Brasil fechou 2024 com um acréscimo de 10.853,35 megawatts (MW), de acordo com levantamento realizado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). A expansão verificada é a maior registrada desde o início da medição, em 1997, e ultrapassou em 747,35 MW a meta definida pela Agência para 2024, que era de 10.106 MW. Desse total, 91,13% da potência instalada é proveniente das fontes solar fotovoltaica (51,87%) e eólica (39,26%) (ANEEL, 2025).

Devido à vasta extensão territorial e ao alto nível de irradiação solar presente no Brasil, o país possui um imenso potencial para o desenvolvimento da geração solar, tanto em projetos centralizados quanto distribuídos. O Atlas Solar Global, publicado pelo *World Bank Group* (2023), oferece um conjunto de mapas que fornecem informações sobre irradiação e potencial fotovoltaico em diferentes países e regiões. No caso do Brasil, o mapa do potencial fotovoltaico destaca que uma parte significativa do território nacional possui condições ideais para a geração de energia elétrica com alta eficiência, especialmente em áreas do interior do Nordeste, Sudeste e Centro-Oeste.

É importante ressaltar que o potencial solar do Brasil supera em muito o de outras fontes de energia. Conforme observado por Sauaia (2019), o potencial brasileiro para geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis é vasto, incluindo 172 GW para energia hídrica (sendo mais de um terço na Região Amazônica), 440,5 GW para energia eólica, 285,19 GW para energia solar em projetos centralizados e 164,1 GW para energia solar em projetos residenciais de geração distribuída. Em comparação, a capacidade instalada de geração de energia elétrica no Brasil atualmente é de aproximadamente 195 GW em projetos com outorga, acrescidos de mais 22 GW em geração distribuída. Portanto, existem vastas oportunidades de investimento para atender às necessidades do país por meio de fontes renováveis, especialmente utilizando os recursos solar e eólico.

A Geração Distribuída (GD) é composta por instalações de geração conectadas diretamente à rede de distribuição, com capacidade de até 30 MW. A GD pode ser classificada em dois grupos de acordo com sua capacidade: Minigeração Distribuída, para instalações com capacidade de até 5 MW, e Microgeração Distribuída, para instalações com capacidade de até 75 kW (Taranto, 2017).

Atualmente, o consumidor que instala uma GD solar fotovoltaica em sua unidade consumidora, conhecida como *rooftop*, torna-se também um produtor de energia, ou seja, um produtor-consumidor. Esse modelo permite que o consumidor supra seu consumo com a energia gerada localmente, além de poder injetar o excedente de energia produzida na rede de distribuição (Schuck, 2020).

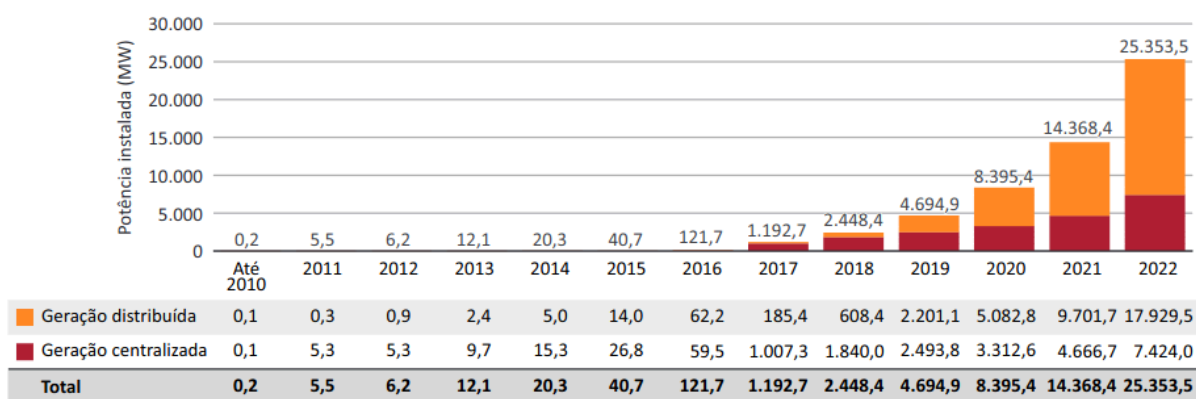
A produção residencial tem se tornado uma parte significativa da GD, especialmente no setor de energia solar fotovoltaica, que é um dos mais rápidos em crescimento na matriz energética. Com o avanço das tecnologias e a redução dos custos de instalação, a GD está permitindo que consumidores residenciais se tornem protagonistas na geração de energia,

colaborando diretamente com a sustentabilidade e descentralização da produção de energia elétrica. O aumento da geração distribuída no setor residencial tem sido notável nos últimos anos, refletindo em um maior engajamento dos consumidores no mercado de energia. Esse avanço está contribuindo para a diversificação da matriz energética e promovendo uma maior autonomia para os usuários.

A GD não se limita apenas ao setor residencial. Ela também inclui setores comerciais e industriais, que têm adotado sistemas de geração solar fotovoltaica e outras fontes renováveis, como eólica e biomassa (Schuck, 2020). O aumento na adesão a esses sistemas em diversos setores tem levado a uma transformação significativa na forma como a energia é gerada, distribuída e consumida no país. A Figura 2 ilustra o notável crescimento da produção de GD nos últimos anos, destacando a contribuição crescente do setor residencial para a matriz energética nacional.

A geração centralizada fotovoltaica se dá a partir de usinas de grande porte tipicamente instaladas em solo sob estruturas metálicas fixas ou com ou com seguimento da trajetória aparente do sol em um eixo, com potência instalada superior a 5MW (Melo, 2022).

**Figura 2** - Evolução da capacidade instalada de geração de energia solar no Brasil (MW)



**Fonte:** Aneel (2023). Elaboração: Etene, 2023.

Conforme mostrado na figura anterior, nos últimos anos, a geração solar no Brasil teve grande impulso, em razão dos avanços no marco legal da geração distribuída e da queda no preço dos equipamentos fotovoltaicos. A partir de 2017, a potência de geração fotovoltaica no país experimentou crescimento expressivo, tendo alcançado 25.353,5 MW no final de 2022.



No Nordeste brasileiro, antes dominado pela energia hídrica, tem ocorrido uma transição para a ascensão das fontes eólica e, mais recentemente, solar. Conforme a segunda edição do Atlas Brasileiro de Energia Solar (2017), a região Nordeste, especialmente a região semiárida, está sendo reconhecida como um destino preferencial para investimentos em geração de energia elétrica a partir da fonte solar. A região dispõe dos melhores parâmetros, na qual apresenta o maior nível de irradiação no plano inclinado com uma média anual de 5,52 (kWh/m<sup>2</sup>.d) e menor variabilidade interanual durante o ano (Pereira *et al.*, 2017). Isso se deve à alta irradiação solar encontrada na região, associada à baixa pluviometria e nebulosidade ao longo do ano (Bezerra, 2023).

### 3.3 Eventos extremos e seus impactos

Os desafios tecnológicos e econômicos para ampliar a participação da energia solar na matriz elétrica brasileira têm sido superados nos últimos anos. Contudo, ainda persistem lacunas relacionadas à variabilidade da oferta e à dependência das condições meteorológicas e climáticas (De Sousa e Cheng, 2015; Machado *et al.*, 2016). Embora grande parte do território brasileiro esteja localizada na região tropical, que recebe elevada incidência de radiação solar ao longo do ano com baixa variabilidade interanual (Pereira *et al.*, 2006; Martins *et al.*, 2008), a caracterização precisa do recurso solar é essencial para o desenvolvimento de sistemas solares. Isso se deve ao fato de a radiação solar alcançar a superfície de maneira variável, influenciada principalmente por sistemas meteorológicos e pela sazonalidade.

As condições atmosféricas de tempo (em escalas de horas a poucos dias) e clima (em escalas de meses a anos) representam obstáculos significativos para a exploração e uso pleno do recurso solar. A disponibilidade e variabilidade temporal e espacial desse recurso estão diretamente associadas às condições meteorológicas e climáticas da região. Certos sistemas atmosféricos alteram a nebulosidade e as concentrações de gases e aerossóis, impactando os processos de transferência radiativa que atenuam a radiação solar incidente (Pereira *et al.*, 2017). Apesar do elevado potencial de radiação solar na região tropical do Brasil, o índice de nebulosidade é igualmente elevado. Além disso, parâmetros meteorológicos como temperatura do ar, vapor d'água, concentração de aerossóis, velocidade e direção do vento podem provocar flutuações no desempenho de módulos fotovoltaicos, ocasionando instabilidades em usinas solares (Yagli *et al.*, 2019; Nobre, 2015).

Nos últimos anos, eventos extremos de chuva no Sudeste e Nordeste do Brasil (NEB) resultaram em várias perdas sociais e econômicas na região (Ávila *et al.*, 2017). A

variabilidade climática do NEB é influenciada pela interação de diversos mecanismos físicos, que determinam a distribuição das precipitações na região. Fatores como a posição geográfica, o relevo e os sistemas meteorológicos que atuam no NEB desempenham um papel crucial na definição das variações sazonais do clima local (Cavalcanti *et al.*, 2009; Oliveira *et al.*, 2017). O regime de chuvas na região é marcado por uma alta variabilidade espacial e temporal, conforme destacado por Reboita *et al.*, (2010) e da Silva *et al.*, (2019), o que influencia diretamente a ocorrência de eventos extremos. Esses fatores tornam a região suscetível às mudanças climáticas, uma vez que a região depende fortemente de chuvas sazonais e altamente irregulares. Essa variabilidade é impulsionada por sistemas meteorológicos de diferentes escalas, incluindo sistemas sinóticos, fenômenos intrasazonais e padrões interanuais, que podem ser significativamente alterados por mudanças nos padrões climáticos globais.

Esses eventos extremos frequentemente estão associados à interação de diversos sistemas atmosféricos, com a Temperatura da Superfície do Mar (TSM) dos oceanos Pacífico e Atlântico tropicais desempenhando um papel importante na determinação da quantidade de chuva (Kousky 1979; Moura e Shukla 1981; Pezzi e Cavalcanti 2001; Rao *et al.*, 2007; Liebmann *et al.*, 2011). As Ondas de Leste (OL) ocasionalmente também causam chuvas intensas nessa região (Pereira *et al.*, 2014). Os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN) são responsáveis por chuvas de dezembro a fevereiro, afetando principalmente Alagoas e Pernambuco, conforme a atuação de suas periferias (Kousky e Gan, 1981; Reis *et al.*, 2021; Lyra e Arraut, 2023). A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) influencia o setor nordeste do NEB, com maior intensidade no Rio Grande do Norte entre janeiro e fevereiro (Utida *et al.*, 2019). Sistemas de mesoescala, como Linhas de Instabilidade (LI) e Complexos Convectivos de Mesoescala (CCMs), também contribuem para precipitações de curta duração (Oliveira e Oyama, 2019; Lyra *et al.*, 2022; Fedorova e Levit, 2023). As Frentes Frias, originárias de latitudes médias, impactam principalmente o Estado da Bahia (Kousky, 1979; Fedorova *et al.*, 2016; Lyra *et al.*, 2019). As OL, associadas aos ventos alísios, têm maior frequência entre abril e agosto, sendo responsáveis por mais da metade da precipitação nesse período, especialmente durante fases negativas do El Niño-Oscilação Sul (ENOS) – La Niña (Gomes *et al.*, 2019; Medeiros *et al.*, 2020). Essas interações tornam o NEB, especialmente as áreas costeiras, vulnerável a eventos extremos, como secas severas e chuvas intensas, que têm ocorrido com maior frequência nos últimos anos, trazendo impactos significativos à infraestrutura e à segurança hídrica.

A precipitação no NEB apresenta uma intensa variabilidade espaço-temporal, com episódios de chuva intensa intercalados por longos períodos de seca (Medeiros *et al.*, 2019; Silva *et al.*, 2022). A modelagem atmosférica é uma das principais ferramentas para a previsão de eventos de chuva severa (Lala *et al.*, 2021), apesar dos diversos desafios associados, como a já mencionada forte variabilidade espaço-temporal da precipitação, eventos altamente isolados desencadeados por fatores em escala local e a falta de total compreensão dos processos físicos relacionados. Além disso, há a dificuldade em verificar os resultados do modelo, o que pode exigir uma rede densa de observação (Merino *et al.*, 2022), Gebrechorkos *et al.*, (2022), avaliaram o desempenho de cinco modelos para eventos de precipitação média e extrema e concluíram que todos os modelos apresentam bom desempenho para valores médios em previsões de curto e longo prazo, mas a capacidade de previsão é limitada para dias com precipitação intensa. Diversos estudos utilizando o modelo *Weather Research and Forecasting* (WRF) (Skamarock e Klemp *et al.*, 2008) demonstraram que essa ferramenta é capaz de representar eventos extremos de precipitação tanto em escalas diárias quanto subsidiárias (Pereira *et al.*, 2012; Herman *et al.*, 2016; Nooni *et al.*, 2022; Gao *et al.*, 2022).

As equações dos modelos de previsão numérica do tempo (NWP em inglês - *Numerical Weather Prediction*) são resolvidas em diferentes pontos de grade do modelo como uma unidade de elemento finito, geralmente em uma grade regular. No entanto, muitos processos são difíceis de descrever completamente, especialmente se ocorrem em escalas menores do que a resolução do modelo. Para isso, são utilizados processos de parametrização que tentam representar, por aproximação, o comportamento das partículas com base em leis físicas e observações empíricas (Gettelman & Rood, 2016). Dessa forma, os modelos dependem de vários pacotes físicos, alguns dos quais usam aproximações para processos que são relativamente pequenos em comparação com a grade do modelo. Assim, as características atmosféricas podem variar muito, e a combinação ideal desses pacotes físicos varia conforme a região (Jeworrek *et al.*, 2021).

Na modelagem atmosférica, os processos de precipitação estão fundamentalmente associados a: (i) parametrizações de microfísica, que governam a formação, o crescimento e a dissipação de partículas de nuvem (Kessler, 1969); (ii) parametrização de cúmulos, que representam uma série de funções, como a distribuição vertical de aquecimento/resfriamento e secagem/umidificação, o transporte de massa por convecção, a geração das fases líquida e de gelo da água, as interações com a camada limite planetária (PBL em inglês - *Planetary*

*Boundary Layer*), as interações com a radiação e as interações mecânicas com o fluxo médio (Arakawa, 2004); (iii) parametrizações da PBL, que podem modular a representação da mistura turbulenta na troposfera inferior por meio dos perfis verticais cinemáticos e termodinâmicos que influenciam diretamente a representação da flutuabilidade e do cisalhamento do vento vertical, além da evolução da precipitação; (iv) parametrizações de superfície terrestre, que controlam os fluxos de calor e umidade do solo e fornecem ao modelo as entradas de calor, umidade e radiação emitida pelo solo que afetam as variáveis de entrada para outras parametrizações e que, apesar de serem menos investigadas em estudos de sensibilidade de NWP, desempenham um papel importante no ciclo diurno da precipitação (Arakawa, 2004; Wong *et al.*, 2020).

Diversos estudos investigaram a contribuição de esquemas de microfísica e cúmulos em eventos de chuva intensa (Tapiador *et al.*, 2012; Mahbub, 2014; Jeworrek *et al.*, 2019; Lu *et al.*, 2019), com alguns resultados indicando que: (i) o custo computacional adicional de usar esquemas mais sofisticados nem sempre garante uma previsão melhor; (ii) há uma contribuição maior da microfísica do que dos esquemas de cúmulos para simulações de alta resolução; (iii) a precipitação depende da razão de mistura da água de chuva concentrada entre níveis baixos e médios; (iv) diferentes usos de parametrizações físicas podem causar maior dispersão na previsão por conjunto do que a dispersão causada pelas condições iniciais perturbadas.

No NWP, um intervalo de resoluções de modelo no qual não está claro se o processo deve ser parametrizado e onde os esquemas de parametrização são projetados para representar processos em subgrade, que não são explicitamente resolvidos por serem espacial ou temporalmente muito pequenos, muito complexos e caros, ou pouco compreendidos, é chamado de "zona cinzenta", Jeworrek *et al.*, (2019) em uma revisão abrangente das parametrização de cúmulos e microfísica na zona cinzenta convectiva, obtiveram melhores resultados para simulações de alta resolução com a parametrização de cúmulos ativada, mas alertam que detalhes em pequena escala e ruídos podem contribuir para a redução da capacidade de previsão, e, portanto, cada configuração de modelo deve ter sua própria avaliação. Outros estudos mostraram que ativar a parametrização de cúmulos para alta resolução pode melhorar a previsão de precipitação (Gao *et al.*, 2017; On *et al.*, 2018), enquanto outros demonstraram melhorias significativas na convecção calculada explicitamente em regiões de terreno complexo e melhorias menos significativas em regiões planas (Wagner *et al.*, 2018).

Alguns estudos verificaram a influência dos esquemas da PBL (Cohen *et al.*, 2015; Jia & Zhang, 2020; Falasca *et al.*, 2021), indicando que esquemas com resolução não local, que consideram a camada profunda cobrindo múltiplos níveis e representam os efeitos da mistura vertical pela PBL, são mais suscetíveis a estratificações instáveis, produzindo mistura turbulenta mais forte do que esquemas com resolução local, que consideram apenas os níveis imediatamente adjacentes no modelo, são aplicáveis a estratificações estáveis e produzem menos mistura turbulenta. Quanto aos estudos de sensibilidade dos modelos de superfície, que controlam os processos de troca de umidade, calor e momento entre a superfície e a atmosfera e também controlam os campos meteorológicos próximos à superfície, eles são sensíveis aos processos dessa camada. Estudos como os de He *et al.*, (2017) e López-Bravo *et al.*, (2018) sugerem que as incertezas nos modelos de superfície, por exemplo, mudanças na extensão das áreas urbanas e alterações associadas a variáveis dinâmicas e termodinâmicas, têm induzido circulações locais e influenciado os campos de temperatura do ar, precipitação e vento.

Stensrud *et al.*, (2009) previram que, em meados de 2020, devido à utilidade das previsões de alta resolução e ao rápido e contínuo aumento do poder computacional, o NWP se tornaria um componente importante do sistema de alerta em escala convectiva. A alta resolução dos modelos poderia fornecer informações sobre a evolução e a estrutura das tempestades, e os modelos devem ser iniciados com uma representação precisa da convecção, de modo a obter a correspondência necessária entre o que foi previsto e o que é observado. Os desafios para atingir esse objetivo incluíram melhorias nos métodos de assimilação de dados, maior uso de observações de radar e melhorias nos esquemas de parametrização dos modelos, além de uma compreensão completa das forças que iniciam e organizam tempestades severas, bem como dos parâmetros ambientais que permitem identificar e monitorar essas forças (Jorgensen & Weckwerth, 2003).

### **3.4 Modelos Numéricos de Mesoescala: O Modelo WRF/WRF-Solar**

Vários modelos numéricos de mesoescala como, por exemplo, o RAMS (*Regional Atmospheric Modeling System*) descrito em Cotton *et al.*, (2003), o RSM (*Regional Spectral Model*) descrito em Juang e Kanamitsu (1994), o MM5 descrito em Duhdia *et al.*, (2005), entre outros, resolvem processos físicos desde a superfície até a alta atmosfera. Estes modelos são aplicados desde estudos de previsão de tempo, até a avaliação de dispersão de poluentes.

O modelo atmosférico WRF é um modelo de previsão numérico de tempo, desenvolvido tanto para fins de pesquisa quanto operacionais. Foi desenvolvido

conjuntamente por uma série de instituições e agências governamentais: *National Center for Atmospheric Research* (NCAR), *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), *Forecast Systems Laboratory* (FSL), *Air Force Weather Agency* (AFWA), *Naval Research Laboratory*, *Oklahoma University* e *Federal Aviation Administration* (FAA). O referido modelo é de domínio público sendo disponibilizado gratuitamente (Skamarock e Klemp, 2008), possui um sistema de assimilação de dados com captação em três dimensões, além disso, pode ser configurado para resoluções horizontais desde a escala de metros até milhares de quilômetros.

As principais parametrizações físicas deste modelo estão divididas em cinco categorias distintas: microfísica, parametrização de nuvens, parametrização da PBL, modelos de ocupação do solo e radiação. As opções de esquemas físicos foram sendo incorporadas ao WRF com a intenção de produzir um único sistema de modelagem. Assim, o maior problema enfrentado consiste em escolher um grupo de parametrizações que seja adequado às condições da região a ser estudada e também à capacidade computacional disponível.

Neste estudo, foi conduzida uma pesquisa utilizando a configuração específica do WRF, o sistema de modelagem WRF-Solar, que é considerado o modelo mais avançado para o mapeamento da radiação solar. Haupt *et al.*, (2018), abordaram a questão da modelagem da irradiação solar e é apresentado o SUN4CAST®, um sistema em desenvolvimento para previsão de energia solar nos Estados Unidos. Em linhas gerais, o sistema começa com o diagnóstico das condições meteorológicas por meio de imagens de satélite, medições de radiação solar, aerossóis atmosféricos e câmeras de nuvens, seguido por diferentes abordagens de modelagem, incluindo estatística e previsão numérica do tempo. As simulações desses modelos são integradas em várias escalas de tempo, culminando em um pós-processamento final que fornece informações específicas para o setor elétrico e para os tomadores de decisão (Ramos *et al.*, 2020).

O sistema utiliza o WRF-Solar, uma versão aprimorada do WRF com melhorias físicas desenvolvidas sob medida para atender às demandas da indústria de energia solar (Jimenez *et al.*, 2016). Ao incorporar algoritmos otimizados para o cálculo da radiação solar e parametrizações mais detalhadas, como o esquema de radiação RRTMG (*Rapid Radiative Transfer Model for GCMs*), o WRF-Solar permite simular com maior precisão processos como a formação de nuvens, a dispersão da radiação e a interação da radiação com a superfície. Essa precisão é fundamental para diversas aplicações, como o dimensionamento de

sistemas fotovoltaicos, a análise de recursos solares e a avaliação do impacto de eventos extremos na geração de energia solar, como também, oferece a flexibilidade de utilizar resoluções espaciais e temporais mais altas, permitindo capturar a variabilidade da radiação solar em pequenas escalas e gerar previsões mais detalhadas. Além disso, o modelo pode ser utilizado em conjunto com sistemas de informação geográfica para visualizar e analisar os resultados de forma mais intuitiva.

A parametrização é fundamental para representar fenômenos atmosféricos em escalas menores do que a resolução do modelo. O WRF-Solar, por exemplo, utiliza esquemas de parametrização da radiação solar, convecção e microfísica para simular com maior precisão a variabilidade dessa radiação em diferentes escalas. Essa capacidade, combinada com a flexibilidade de utilizar resoluções mais altas, permite capturar a variabilidade da radiação solar em pequenas escalas e gerar previsões mais detalhadas. Ao agregar os resultados do modelo com sistemas de informação geográfica, é possível visualizar e analisar de forma mais intuitiva a distribuição espacial e temporal da radiação solar, facilitando a identificação de padrões e tendências. Neste estudo foi realizada uma avaliação dessas três categorias de parametrizações.

O processo radiativo é o mais importante da atmosfera sendo responsável por todo balanço de energia que alimenta os demais processos atmosféricos. O esquema de parametrização de radiação solar reproduz os efeitos da radiação de ondas curta e longa na atmosfera e no solo e sua interação com alguns componentes da atmosfera. Os processos relacionados com movimentos ascendentes ocasionados por diferenças de densidade ou por forçantes topográficas ocorrem muitas vezes em escalas espaciais menores do que o espaçamento utilizado na resolução das equações do modelo. Como exemplo, tem-se a formação de uma nuvem cumulonimbus, a qual possui dimensões espaciais horizontais menores do que a maioria das resoluções horizontais utilizadas nos modelos. Desta maneira, estes processos convectivos necessitam ser parametrizados.

Muitas vezes os processos convectivos estão associados à formação de nuvens e conseqüentemente precipitação, além da transferência de momento e de propriedades térmicas entre as camadas mais baixas e mais altas da atmosfera. Esta distribuição de propriedades na coluna atmosférica poderá produzir instabilidade atmosférica e, assim, resultar na formação de nuvens. Muitos modelos e esquemas de nuvens tratam de processos específicos para

representar a precipitação. O esquema de microfísica de nuvens trata de forma explícita a formação dos hidrometeoros que as constituem.

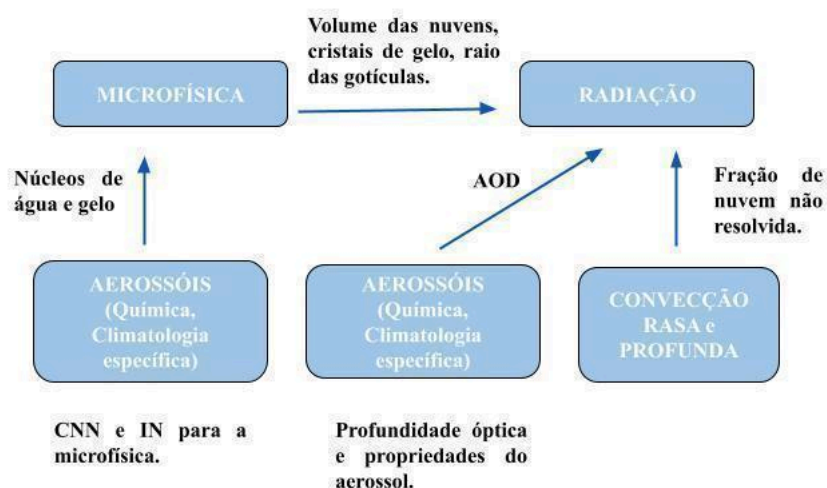
Essencialmente, a parametrização de microfísica descreve a evolução das características de hidrometeoros no tempo, os mecanismos de interação entre as mesmas e a permanente troca de vapor e calor com a fase gasosa. As categorias inicialmente envolvidas nos processos microfísicos são as gotículas de nuvens e cristais de gelo. Este tipo de parametrização garante certa versatilidade ao usuário, ao permitir que o experimento numérico seja conduzido dentro de certas restrições por ele estabelecidas, como por exemplo, a escolha do conjunto de hidrometeoros a serem introduzidos na simulação, como também é possível que o usuário defina o diâmetro médio para cada categoria de gelo e água nos processos de microfísica (Skmarock e Klemp, 2008).

As interações aerossol-radiação se combinam com as partículas presentes nas nuvens para ajustar o albedo e o tempo de vida das nuvens. Esse fenômeno é conhecido como o efeito indireto do aerossol e normalmente é considerado apenas em modelos NWP que tratam explicitamente da química atmosférica. A maioria dos modelos utiliza parâmetros independentes para o raio das gotículas de nuvem e o tamanho dos cristais de gelo na representação da radiação e da microfísica (Stensrud, 2007). As nuvens são consideradas homogêneas em relação ao tamanho das partículas microfísicas que interagem com a radiação, o que impede o acoplamento necessário para o efeito indireto. Aprimorar essas e outras características dos modelos NWP é importante para oferecer uma estrutura de modelagem mais precisa da radiação de ondas curtas, o que pode facilitar a implementação de usinas de energia solar (Jimenez *et al.*, 2015).

O modelo se baseia na estrutura de modelagem do WRF e foi desenvolvido por meio de um projeto financiado pelo *Department of Energy* (DOE-USA) que busca melhorias nas previsões de GHI e DNI (em inglês - *Direct Normal Irradiance*). Os aprimoramentos introduzidos no WRF para criar o WRF-Solar se concentram em melhorar a representação do sistema de nuvem-aerossol-radiação (Jimenez *et al.*, 2016).

**Figura 3** - Interações do sistema nuvem-aerossol-radiação





Fonte: Adaptado de Oliveira, 2014.

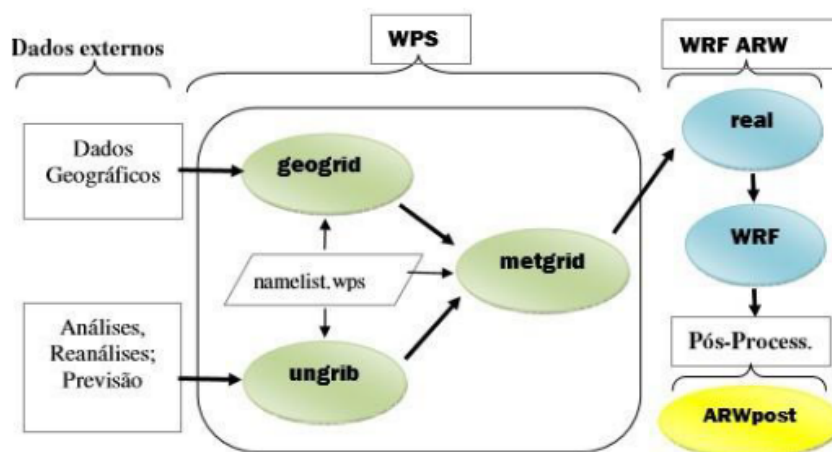
A Figura 3 ilustra as interações das novas parametrizações do modelo. Segundo Jimenez *et al.*, (2016), resumidamente, os principais aperfeiçoamentos desenvolvidos no WRF-Solar são a disponibilidade das componentes GHI, DNI e DHI (em inglês - *Diffuse Horizontal Irradiance*), parametrização do efeito direto do aerossol com melhorias na representação das interações entre radiação solar – aerossol e radiação solar – nuvem (Ruiz-Arias *et al.*, 2014); parametrização do efeito indireto do aerossol, que inclui os processos físicos entre formação de nuvem e as propriedades higroscópicas de aerossol (Ginoux *et al.*, 2001; Thompson e Eidhammer, 2014; Thompson *et al.*, 2015); parametrização de nuvens de subgrade, resolvendo nuvens rasas e profundas e seus efeitos na radiação de onda curta (Deng *et al.*, 2014); implementação do algoritmo FARMS (em inglês - *Fast All-sky Radiation Model for Solar Applications*) (Xie *et al.*, 2016), que calcula a irradiação solar para cada passo de tempo do modelo.

Diversos estudos ressaltam os benefícios desses aperfeiçoamentos do modelo para previsão solar. O WRF-Solar reduz amplamente os erros na simulação com céu claro onde se torna primordial aferir adequadamente os impactos dos aerossóis atmosféricos (Jimenez *et al.*, 2016).

A estrutura de modelagem do WRF-Solar é a mesma do WRF, este possui uma variedade de opções de parametrizações físicas e dinâmicas, com dois núcleos de solução dinâmica: o *Advanced Research WRF* (ARW), desenvolvido primariamente pelo NCAR, e o *Nonhydrostatic Mesoscale Model* (NMM), desenvolvido pelo NCEP (Oliveira, 2014). O

WRF-ARW é composto pelos seguintes componentes principais: WPS, ARW e pós-processamento. A Figura 4 ilustra os componentes principais do WRF.

**Figura 4** - Esquema simplificado da arquitetura do modelo WRF



Fonte: Santos, 2019

WPS (*WRF Preprocessing System*): O módulo de pré-processamento constituído de três programas, têm a tarefa de preparar as condições iniciais e de contorno. O conjunto de três programas, sendo estes o geogrid, ungrib e metgrid, interpolam dados estáticos de topografia e de uso e ocupação de solo e dados meteorológicos (grib data) para serem processados no programa ‘real.exe’, onde está localizado o núcleo dinâmico.

O geogrid define os domínios da simulação, a partir dos valores definidos pelo usuário no arquivo ‘namelist.wps’. Este programa também cria arquivos estáticos dos dados terrestres, interpolando os dados de uso de solo, altitude do terreno e outras características geográficas, para todas as grades do domínio. O ungrib lê e converte os arquivos GRIB em um formato intermediário. Esses dados GRIB contém as variáveis meteorológicas obtidas de um modelo de maior escala, que servirão como as condições iniciais e de fronteira lateral. O metgrid faz a interpolação dos dados meteorológicos convertidos do formato GRIB para os domínios definidos pelo geogrid para serem inseridos no programa ‘real.exe’ (Skamarock e Klemp, 2008; Oliveira, 2014).

Geralmente, os dados estáticos de entrada são concedidos pelo *United States Geological Survey* (USGS) com resolução de 10’,5’,2’e30”, enquanto os dados meteorológicos são provenientes de previsões, análises e reanálises de modelos globais de

previsão numérica, tal como o *Global Forecast System* (GFS) do NCEP com resolução horizontal de  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  e resolução temporal a cada 6h.

O núcleo ARW é responsável pelo processamento principal, que, a princípio, inicia-se pelo programa ‘.real’, responsável por preparar os dados de entrada e as condições iniciais e de contorno para a simulação. Em seguida, o processamento é continuado pelo programa ‘.wrf’, que executa o núcleo ARW, realizando a modelagem da atmosfera e gerando as previsões. O ARW resolve a dinâmica dentro do modelo WRF, englobando também as parametrizações físicas. Neste núcleo dinâmico são resolvidas as equações compressíveis e não-hidrostáticas de Euler em escalas que variam de alguns metros a milhares de quilômetros. Tais equações são formuladas usando um sistema de coordenadas verticais de pressão que acompanham o relevo nos níveis mais próximos da superfície até o topo da fronteira superior do modelo, denominada coordenada eta  $\eta$  (Skamarock e Klemp, 2008).

A habilidade de energia solar prevista melhorou na última década para atender à crescente demanda por eletricidade gerada por energia solar (Murata et al., 2018). As melhorias são realizadas principalmente através dos avanços na representação de processos físicos por NWP, observações e técnicas de assimilação de dados e algoritmos de inteligência artificial que transferem a irradiância solar para a produção de energia solar (Jimenez et al., 2016; Yang, 2019; Rodríguez-Benítez et al., 2020; Riihimäki et al., 2021). Estudos anteriores demonstraram que a evolução das nuvens e dos aerossóis torna a energia solar particularmente variável no espaço e no tempo, trazendo grandes desafios para os NWPs fornecerem previsões confiáveis (Haupt et al., 2017; Jiménez et al., 2016, Liu et al., 2022; ; Huang et al., 2022 entre outros).

O modelo WRF-Solar foi desenvolvido especificamente para aplicações solares, incluindo tratamentos explícitos de nuvens de sub-rede e feedbacks de radiação de nuvens de aerossol em cima do modelo WRF (Jimenez et al., 2016). O tratamento de nuvens e aerossóis do WRF-Solar foi aprimorado nos últimos anos. Por exemplo, um esquema de nuvem de sub-rede desenvolvido pela Thompson (CLD3) foi introduzido para melhorar a simulação da nuvem, contabilizando os efeitos radiativos das nuvens não resolvidas, levando a uma melhoria de cerca de 18% na previsão de prazo de execução de curto prazo da GHI (Liu et al., 2022). Além disso, o esquema Thompson-Eidhammer (Thompson & Eidhammer, 2014; daqui em diante TE14) foi atualizado pela adição do tratamento do carbono negro (BC), um importante aerossol absorvente de luz e a capacidade de usar estimativas de aerossol variando

no tempo. O WRF-Solar, portanto, fornece uma representação explícita dos efeitos aerossóis diretos e indiretos nos feedbacks de radiação de nuvem-aerossol, melhorando ainda mais as estimativas de irradiância em diferentes condições de nuvem e aerossol (Liu *et al.*, 2022).

$$\eta = (P - P_{top}) / (P_0 - P_{top}) \quad (1)$$

Sendo  $P$  a pressão em um determinado nível  $\eta$ ,  $P_{top}$  a pressão no topo do perfil atmosférico e  $P_0$  a pressão na superfície (hPa).

Nesse sistema de coordenadas verticais de massa,  $\eta$  assume valores entre 1 na superfície e zero no topo do domínio vertical do modelo. Todos os cálculos que são executados pelo WRF-ARW com intuito de simular a atmosfera, são baseados em um conjunto de equações que representam de forma realística o máximo de processos físicos possíveis. A natureza não linear e caótica da atmosfera levou à elaboração de equações para descrever estes processos as quais, atualmente, não podem ser resolvidas analiticamente, tornando necessária a aplicação de métodos numéricos (Lorenz, 1963).

Além de acrescentar erros ao sistema, o uso de soluções numéricas exige a discretização do espaço e do tempo para resolvê-las. Este processo estabelece que a solução seja feita em pontos específicos, distribuídos em uma grade sobre a região de interesse, e em cada nível vertical a cada passo de tempo (Kitawaga, 2018). As equações não hidrostáticas de Euler são utilizadas para representar as propriedades conservativas do fluxo, em coordenadas verticais de pressão hidrostática (Laprise *et al.*, 1992). As equações, na forma diferencial são:

Conservação da Quantidade de Movimento

$$\partial_t U + (\nabla \cdot \mathbf{V}u) - \partial_x(p\phi\eta) + \partial\eta(p\phi x) = FU \quad (2)$$

$$\partial_t V + (\nabla \cdot \mathbf{V}v) - \partial_y(p\phi\eta) + \partial\eta(p\phi y) = FV \quad (3)$$

$$\partial_t W + (\nabla \cdot \mathbf{V}w) - g(\partial\eta p - \mu) = FW \quad (4)$$

Conservação da Energia Termodinâmica

$$\partial_t \Theta + (\nabla \cdot \Theta) = F\Theta \quad (5)$$

Conservação da Massa

$$\partial_t \mu + (\nabla \cdot \mathbf{V}) = 0 \quad (6)$$

Equação geopotencial

$$\partial_t \phi + \mu^{-1}[(\mathbf{V} \cdot \nabla) \phi - gW] = 0 \quad (7)$$

Equação do Estado Termodinâmico

$$p = p_0 (Rd\Theta/p_0\alpha)^{\gamma} \quad (8)$$

Em que,  $\mathbf{V} = \mu \mathbf{v} = (U, V, W)$ ,  $\Theta = \mu \theta$ ;  $\mathbf{v} = (u, v, w)$  são as velocidades covariantes nas direções horizontal e vertical;  $\theta$  a temperatura potencial;  $\phi = gz$  o geopotencial;  $p$  a pressão;  $\alpha = 1/\rho$  o inverso da densidade;  $\gamma = cp/cv$  a razão entre calores específicos para o ar seco,  $Rd$  a constante para o ar seco e  $p_0$  a pressão de referência (tipicamente de  $10^5$  Pascals). Os termos  $FU$ ,  $FV$ ,  $FW$ ,  $F\Theta$ , representam as forçantes inerentes, segundo a física do modelo, mistura turbulenta, projeções esféricas e rotação da Terra. Além disso, o WRF considera o efeito da força de Coriolis e a inclusão da umidade do ar na equação de Euler.

Os processos físicos de pequena escala, denominados processos de sub-grade, não podem ser representados por equações dinâmicas de um modelo numérico. Por isso, o modelo WRF inclui esses processos físicos através de esquemas de parametrizações (Tuchenhagen, 2013). Nesses esquemas são construídas, no lugar dos complexos modelos teóricos, fórmulas alternativas simplificadas para incluir os termos associados aos fluxos turbulentos de momento, calor e umidade que aparecem devido à integração das equações. As parametrizações são implementadas em módulos separados e estão divididas em: microfísica, radiação atmosférica, camada superficial, Modelo Solo-Superfície, Camada Limite Planetária e parametrização Cumulus (Skamarock e Klemp, 2008). Dentro de cada módulo de parametrização citado, existem outros subconjuntos de parametrizações com o mesmo objetivo, resolver processos implícitos. O emprego de parametrizações é complexo e estas interagem entre si, isto é, qualquer alteração em uma das parametrizações pode afetar todas as outras, que, por sua vez, afetam toda a simulação. Assim, o uso de qualquer tipo de parametrização requer um estudo a fim de verificar quais representam melhor a região em que se pretende realizar a simulação.

Os esquemas de parametrizações de microfísica incluem processos explicitamente resolvidos para o vapor d'água, nuvens e precipitações. O esquema *Thompson aerosol-aware* é relativamente sofisticado e é o mais indicado para o uso com o WRF-Solar. A parametrização inclui processos de nuvem, gelo e água, bem como considera os impactos de aerossóis no desenvolvimento de nuvens e precipitação. Para fornecer uma representação

fisicamente mais consistente dos *feedbacks* de radiação - nuvem, o WRF-Solar adota a nova abordagem de passar o raio efetivo das gotículas de nuvem, gelo e partículas de neve da microfísica para a parametrização de radiação (ondas curtas e longas). Esta interação afeta o albedo da nuvem e ativa o efeito indireto do aerossol, a fim de acoplar completamente o sistema de nuvem-aerossol-radiação. Em uma etapa de tempo correspondente a uma chamada para a física da radiação, o coeficiente de extinção é calculado e passado para a parametrização do aerossol para a radiação (Ruiz-Arias *et al.*, 2014). Desta forma, o WRF-Solar fornece uma representação totalmente acoplada do sistema aerossol-nuvem-radiação (Jimenez, *et al.*, 2016).

Os esquemas de radiação de onda longa e curta fornecem o aquecimento atmosférico devido ao balanço de calor entre Radiação de Ondas Curtas (ROC), incidente no solo, e a Radiação de Ondas Longas (ROL), emitidas pela superfície. Para a parametrização da radiação, nos processos envolvendo ondas longas e ondas curtas, foi utilizado o esquema RRTMG descrito em (Iacono *et al.*, 2008) é o esquema adequado na modelagem com o WRF-Solar pois ao ativá-la a parametrização de ondas curtas RRTMG infere o efeito direto dos aerossóis e os utiliza para solucionar irradiancias difusas e diretas. Os valores de AOD (profundidade ótica do aerossol) permanecem constantes ou mudam lentamente durante o período de simulação (Jimenez *et al.*, 2016). Essa parametrização permite ao usuário impor propriedades óticas do aerossol (Ruiz-Arias *et al.*, 2014), e considera os efeitos da umidade. A parametrização requer a AOD total em 0,550  $\mu\text{m}$  (visível) e a especificação do tipo de aerossol predominante. O conhecimento do tipo de aerossol predominante permite estimar as propriedades óticas restantes do aerossol, incluindo o albedo de espalhamento único e o fator de assimetria.

Os esquemas de parametrização de cúmulos são responsáveis pelos efeitos de escala de subgrade para nuvens rasas e convectivas e é destinada a representar os fluxos verticais devido aos movimentos ascendentes, descendentes e compensatórios fora das nuvens em escalas não resolvidas pela grade do modelo. Os esquemas de nuvens cumulus operam somente em colunas individuais que fornecem perfis verticais de temperatura e umidade. Ademais, essa parametrização não deve ser usada em espaçamento de grades menores que 5 km.

Neste estudo foi utilizado a parametrização de Deng onde a mesma é amplamente utilizada para simular a convecção atmosférica em previsões do tempo, sendo especialmente

eficaz em representar os processos de formação de nuvens e os fluxos de calor e umidade na atmosfera, particularmente em condições de convecção intensa, como tempestades.

A principal característica da parametrização de Deng é a capacidade de modelar a transição entre a convecção de grande escala e os fluxos de menor escala na atmosfera. Ele utiliza a instabilidade do ar e a umidade disponível para calcular a atividade convectiva, levando em consideração como as nuvens afetam a distribuição de vapor d'água e energia na atmosfera.

A parametrização de Deng *et al.* (2014) foi aprimorada para incluir a contribuição da energia cinética turbulenta (TKE) como um parâmetro de estabilidade atmosférica nos cálculos de entranhamento no topo das nuvens. Em razão disso, a parametrização da camada limite atmosférica também foi ajustada para lidar adequadamente com a TKE.

Além disso, este esquema incorpora os efeitos dinâmicos e microfísicos, o que aprimora a previsão de precipitação e a maneira como a energia é distribuída na atmosfera, resultando em simulações mais precisas e realistas.

### **3.5 Breve Revisão Bibliográfica do WRF-Solar**

Jimenez *et al.*, (2016) fizeram um estudo avaliando o desempenho do modelo para previsões durante céu limpo, usando diferentes parametrizações de aerossóis. Tais autores obtiveram melhorias na estimativa das componentes de irradiação, destacando a redução do REQM ( Raiz do erro quadrático médio ) nas simulações do WRF-Solar em comparação com as do WRF padrão. Os resultados mostram uma melhora do GHI (46%), DNI (60%) e DHI (70%) sob previsões de céu claro.

Em 2018, Gueymard e Jimenez, investigaram o desempenho do WRF-Solar ao prever a irradiação solar em um ambiente desértico do Kuwait. Nesse ambiente árido, as condições sem nuvens predominam, enquanto a profundidade ótica do aerossol é altamente variável, o que interfere na irradiação direta normal e, em menor medida, GHI. O estudo comparou o modelo FARMS com o modelo RRTMG. Concluíram que, sob condições de céu claro, os dois modelos apresentam concordância satisfatória, porém nem sempre conseguem prever com precisão as variações da irradiação em condições nubladas.

Testando o desempenho do WRF-Solar em Nova York, Gamarro *et al.*, (2018), compararam os valores modelados com dados de oito estações meteorológicas. Seus resultados

se mostram satisfatórios na previsão da GHI, com um valor médio de coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,93 e um erro médio de 11,08% para condições de céu claro. Para condições de céu nublado, o  $R^2$  foi de 0,76 e o erro médio foi de 20,31%. Quando comparado com estudos anteriores (por exemplo, Lara-Fanego *et al.*, 2012), o modelo WRF-Solar demonstrou valores mais baixos de erro absoluto médio (EMA) entre 2 - 7% e REQM de 5 a 20% para condições de céu claro. Enquanto para condições de céu nublado o EMA oscilou de 23 - 65% e a REQM de 28 a 94%. Essas diferenças foram atribuídas à falta de representação de aerossóis no modelo WRF.

Com o objetivo de aprimorar a previsão de irradiação solar, Gentile *et al.*, (2020) avaliaram o impacto da assimilação de dados tridimensionais (3D-Var) da radiação solar do SEVIRI (*Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager*) a bordo do satélite geoestacionário *Meteosat Second Generation* (MSG) na Itália, utilizando o modelo WRF-Solar. O desempenho do modelo foi analisado tanto em condições de céu claro quanto em céu nublado. Para condições de céu claro, o modelo foi testado sem assimilação, enquanto para céu nublado foram realizadas simulações com assimilação de dados 3D-VAR. Os índices estatísticos confirmaram que a superestimação da GHI pelo modelo é menos evidente quando a assimilação é ativada. Na primeira hora de simulação, o erro quadrático médio é reduzido de 185 para 173 W/m<sup>2</sup> e o erro médio de viés de 54 para 49 W/m<sup>2</sup>. Os resultados desses testes preliminares indicaram que a assimilação de dados de satélites geoestacionários melhoraram o desempenho do modelo WRF-Solar, principalmente nas previsões de curto prazo.

Com o intuito de compreender a intermitência das componentes da radiação solar em Mildura na Austrália, Prasad e Kay (2020) avaliaram o desempenho do modelo WRF-Solar. As condições iniciais e de contorno da simulação foram obtidas a partir do modelo ERA-Interim, e a simulação foi realizada com quatro domínios aninhados, com resoluções de 45, 15, 5, 1,7 respectivamente. Os valores simulados foram validados utilizando dados observacionais de superfície. Os resultados revelaram que, para a GHI e DNI em condições de céu claro, foram observados erros (RMSE) de 134 W/m<sup>2</sup>, 248 W/m<sup>2</sup> e 67 W/m<sup>2</sup>, respectivamente. Esses erros aumentaram para 200, 400 e 100 W/m<sup>2</sup> em dias altamente intermitentes. No geral, o modelo apresentou um desempenho superior para a GHI e DNI em comparação com o modelo WRF padrão, para a região.

Estudos utilizando o WRF-Solar no Brasil, como o Atlas Solar da Bahia trouxe resultados significativos com o mapeamento solar da Bahia, mostrando o potencial promissor



do Estado na geração de energia solar. O detalhamento segue uma escala de 2 km x 2 km no domínio D03 e utiliza condições iniciais e de contorno do Centro Europeu de Previsões Meteorológicas em Médio Prazo – ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*).

Destacando a influência das parametrizações de aerossóis, Sehnem (2018), realizou um estudo no Estado do Rio Grande do Sul utilizando uma escala de 5 km. Os resultados mostraram que o uso das novas parametrizações físicas do WRF-Solar melhoraram significativamente os resultados quando comparados com uma rodada típica do WRF, resultando em um erro menor. Nesta simulação obteve-se um erro médio de 12,26 W/m<sup>2</sup> e erro quadrático médio de 31,08 W/m<sup>2</sup>, estes valores resultaram da média de todas as estações automáticas.

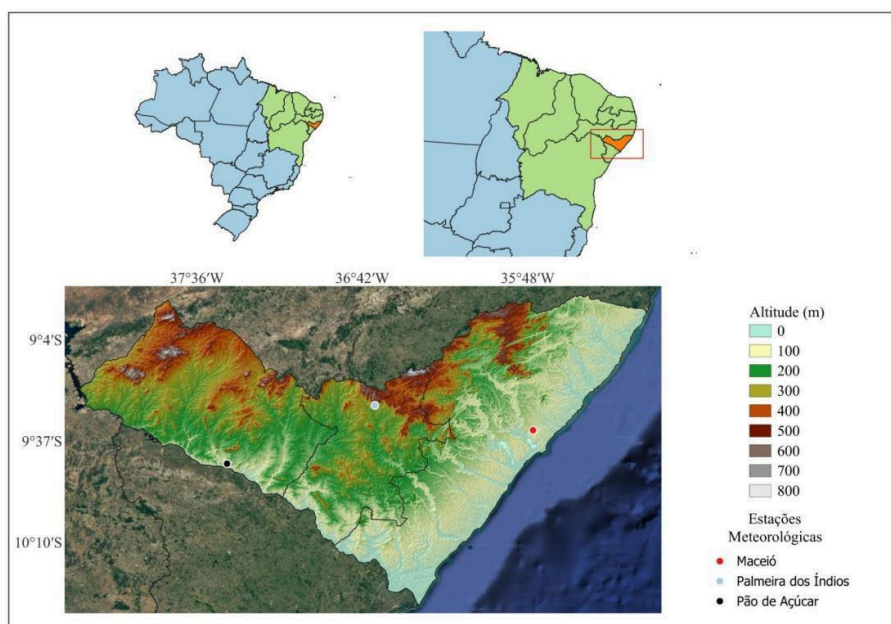
Lima et al. (2025) realizaram um estudo para o Nordeste brasileiro utilizando a irradiância solar global e comparando dois modelos: o GFS-MOS e o WRF-Solar. Os resultados mostraram que o GFS-MOS superou o WRF-Solar, apresentando um bias de 83,09 W/m<sup>2</sup> na estação SLZ, em comparação com 96,37 W/m<sup>2</sup> para o WRF-Solar. O MAE foi de 129,97 W/m<sup>2</sup> para o GFS-MOS, contra 145,86 W/m<sup>2</sup> para o WRF-Solar. Além disso, o coeficiente de correlação de Pearson foi de 0,79 para o GFS-MOS na estação CN2, contra 0,74 para o WRF-Solar. Esses resultados indicaram maior precisão e confiabilidade do GFS-MOS, especialmente para previsões de longo prazo.

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Caracterização da Área de estudo

Este estudo tem como foco a região do estado de Alagoas (Figura 5), situado no Leste do Nordeste brasileiro, possui uma área aproximada de 27.830,661 km<sup>2</sup> (IBGE, 2024), representando aproximadamente 0,33% do território brasileiro. no qual se situa a 8°48'12" - 10°29' S de latitude e 35°09'36" - 38°13'54" W de longitude. Estende-se por 339 km na direção de eixo longitudinal (Leste-Oeste) e 186 km na direção de seu menor eixo (Norte-Sul) (Lyra *et al.*, 2014). De acordo com a literatura, o Estado de Alagoas está dividido em três mesorregiões: o Litoral, o Agreste e o Sertão Alagoano (Souza *et al.*, 2020).

**Figura 5** - Localização da área de estudo, em destaque Estado de Alagoas, as estações meteorológicas demarcadas por pontos.

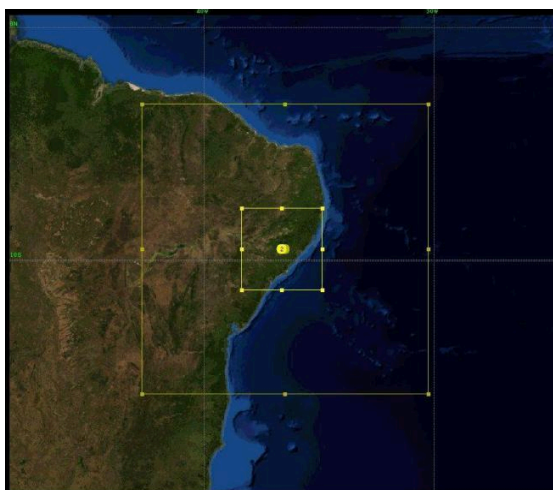


O Leste é a maior região do território, abrangendo o litoral e a microrregião do Sertão. O Agreste é uma região de transição entre as áreas úmidas e as secas. O Sertão alagoano é uma região com áreas áridas e características climáticas do semiárido (IBGE, 2023).

#### 4.2 Descrição do modelo utilizado

As configurações espaciais dos domínios da grade no modelo WRF-Solar são mostradas na Figura 6. O domínio maior (D01) tem resolução de 20 km e cobre todas as áreas do Nordeste Brasileiro (NEB). O D02 abrange a região de Alagoas, onde está localizada a área de estudo.

**Figura 6** - Configuração de grade usada para simulações do WRF-Solar: D01 apresentando resolução horizontal de 20 km e D02, com resolução de 5 km



As simulações atmosféricas, em mesoescala, foram realizadas a partir do modelo atmosférico WRF-Solar (Weather Research and Forecasting - Solar), versão 4.6.0, que é uma extensão do modelo WRF, desenvolvido pelo National Center for Atmospheric Research (Skamarock et al., 2008). O WRF-Solar é uma ferramenta especializada para a previsão de irradiância solar, integrando o modelo WRF com um esquema de parametrização de radiação solar, melhorando assim a previsão de variáveis relacionadas à energia solar. A versão 4.6.0 do WRF-Solar, utilizada neste estudo, incorpora avanços na parametrização de nuvens e aerossóis, sendo capaz de fornecer simulações mais precisas para previsões de energia solar em diversas escalas temporais e espaciais.

As simulações foram feitas com dados de entrada provenientes da reanálise climática global ECMWF Reanalysis v5 (ERA5), com resolução espacial de 30 km e temporal de 3 horas (disponível em: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/ecmwf-reanalysis-v5>). Em ambos os domínios foram adotados 40 níveis verticais para o perfil atmosférico. A validação desses modelos se deu a partir dos pontos de grade de 101x101 contidos no domínio 2, conforme a Figura 6.

O modelo atmosférico WRF-SOLAR conforme descrito por Ramos et al. (2020) com base nas contribuições de Jimenez *et al.*, (2016), apresenta as principais melhorias e novidades desenvolvidas para essa ferramenta: a) disponibilidade das componentes de GHI, DNI e DHI; b) parametrização de efeito direto do aerossol com melhorias na representação radiação solar – aerossol e radiação nuvem (Ruiz -Arias; Dudhia; Gueymard, 2014); c) parametrização do efeito indireto do aerossol, que considera os processos físicos entre formação de nuvem e as propriedades higroscópicas de aerossol (Thompson *et al.*, 2015); d) parametrização de nuvens de sub grade com tratamento híbrido, resolvendo nuvens rasas e profundas e seus efeitos na radiação de onda curta (Deng *et al.*, 2014); e) implementação do algoritmo FARMS (Xie; Sengupta; Dudhia, 2016).

Para as simulações foram realizadas rodadas diárias com duração de 24 horas (para cada dia) entre o período de 01/01/2022 – 29/12/2023. As parametrizações físicas utilizadas no modelo estão descritas na tabela 1.

**Tabela 1** - Detalhes das simulações especificando os parâmetros físicas e os esquemas utilizados

Parâmetros	Esquemas
Microfísica	WSM 6-class graupel (Hong <i>et al.</i> , 2006)
Cumulus	Grell-Freitas (Grell <i>et al.</i> , 2014)
Radiação de ondas curtas	RRTMG (Iacono <i>et al.</i> , 2008)
Radiação de ondas longas	RRTMG (Iacono <i>et al.</i> , 2008)
Camada Limite Superficial	Monin-Obukhov, 1954
Camada Limite Planetária	Mellor-Yamada-Janjic TKE (Janjic, 1994)
Modelo de Superfície Terrestre	Unified Noah Land Surface Model (Tewari, M. <i>et al.</i> , 2004)
Opção de entrada de aerossol para radiação	J. A. Ruiz-Arias (Ruiz-Arias <i>et al.</i> , 2014)
Nuvens de subgrade	Deng (Deng <i>et al.</i> , 2014)

Os esquemas físicos de parametrização foram cuidadosamente selecionados com base nas orientações do Manual do Usuário do WRF-Solar disponível em (<https://ral.ucar.edu/documentation/wrf-solarr-user-guide>). A fim de avaliar a influência das diferentes configurações físicas na previsão da radiação solar, foram conduzidos testes físicos de sensibilidade, nos quais os esquemas de cúmulos e microfísica foram sistematicamente modificados. As simulações resultantes foram comparadas com dados observacionais para identificar a configuração que proporcionava as melhores estimativas de radiação solar.

Durante a configuração do *namelist* para a simulação no WRF-Solar, foram utilizadas duas combinações distintas de parametrizações, denominadas WS-C1 e WS-C2. Na combinação WS-C1, foi configurada a opção de perturbações estocásticas, sem a ativação de outras parametrizações. Isso permitiu uma simulação baseada em um modelo simplificado, no qual as flutuações atmosféricas são incorporadas de forma estocástica, ou seja, de maneira aleatória, sem considerar detalhes mais complexos dos processos físicos de convecção.

Por outro lado, na combinação WS-C2, foi ativada a parametrização de Deng *et al.* (2014), que introduz uma abordagem mais detalhada para simulação de nuvens e convecção. Essa parametrização inclui a física de nuvens de subgrade, que simula a formação e o comportamento das nuvens de maneira mais precisa, levando em conta a contribuição da energia cinética turbulenta (TKE, do inglês "Turbulent Kinetic Energy"). A TKE é um parâmetro crucial para a estabilidade atmosférica, influenciando a movimentação do ar e os processos convectivos, como o entranhamento de ar quente e úmido nas camadas superiores da atmosfera, especialmente no topo das nuvens.

Como resultado dessa abordagem, foi necessário ajustar a parametrização da camada limite atmosférica para uma versão que resolvesse adequadamente a TKE. A camada limite atmosférica refere-se à região da atmosfera mais próxima da superfície, onde os efeitos da fricção e da turbulência são mais intensos, e sua modelagem precisa é essencial para simulações de convecção e previsão de fenômenos climáticos. Ao resolver adequadamente a TKE, o modelo se torna mais sensível às variações na dinâmica da atmosfera, proporcionando uma previsão mais realista dos processos de formação de nuvens e da radiação solar.

Essas duas configurações (WS-C1 e WS-C2) foram utilizadas para comparar o impacto da parametrização de Deng em relação a uma abordagem mais simplificada, com o objetivo de avaliar a precisão das simulações de radiação solar sob diferentes condições atmosféricas e de convecção.

Após a simulação, os dados foram processados em *Python*, utilizando as bibliotecas NumPy, Pandas e Matplotlib para manipulação, análise e visualização gráfica, respectivamente. Este procedimento permitiu a extração de informações relevantes sobre a distribuição espacial e temporal das variáveis de interesse. Em particular, os dados de radiação solar passaram por um tratamento específico para mitigar erros associados à dispersão atmosférica em baixos ângulos solares, com a aplicação de um limiar de 5 graus no ângulo de elevação solar (Mayer *et al.*, 2023). Este limiar considera apenas a radiação solar proveniente de ângulos de elevação superiores a 5 graus, minimizando a influência da dispersão e absorção atmosférica, que são mais pronunciadas em baixos ângulos, especialmente em condições de céu limpo (Tabela 2). A correção é relevante pois, em baixos ângulos, o maior caminho ótico da radiação através da atmosfera aumenta a probabilidade de espalhamento e absorção, afetando a estimativa da radiação que atinge a superfície.

**Tabela 2** - Filtro para dados de Irradiância Solar com base no ângulo zenital

Descrição do Filtro	Ângulo Zenital (Z)	Ângulo de Elevação Solar (elevS)	Condição
Sol próximo ao horizonte	$Z \geq 85^\circ$	$\text{elevS} \leq 5^\circ$	Excluir
Sol com ângulo mais elevado	$Z < 85^\circ$	$\text{elevS} > 5^\circ$	Manter

**Fonte:** Adaptado de Mayer *et al.*, 2023

A partir das simulações, foram gerados mapas de GHI. No primeiro momento na utilização do modelo atmosférico, decidiu-se por verificar a eficiência do modelo WRF-Solar para realizar simulações da variável radiação solar, para as três mesorregiões climáticas do

Estado Alagoas: Litoral (Maceió), Agreste (Palmeira dos Índios) e Sertão (Pão de Açúcar). O *namelist* do WRF-Solar foi configurado em duas combinações distintas, a WS-C1 e WS-C2, com o objetivo de determinar qual delas se adapta melhor à região de estudo e para validação das simulações foi utilizado os dados observados do INMET, os resultados são apresentados em termos de média ( $\mu$ ) e desvio padrão ( $\sigma$ ) na tabela 3.

#### 4.3 Dados observados e instrumentação utilizada

Para avaliação do desempenho das modelagens do WRF-Solar foram utilizados dados observados de radiação horária para validação das estimativas realizadas. O uso de observações terrestres é um método padrão para quantificar o desempenho da WRF-Solar (Jiménez *et al.*, 2016 ; Lee *et al.*, 2017; Dasari *et al.*, 2019; Gentile *et al.*, 2020; Rodríguez-Benítez *et al.*, 2020).

Os dados horários para radiação solar e precipitação foram obtidos do banco de dados da Estação Meteorológica Automática (EMA), oriundas dos sítios de Maceió/AL (A303 - Lat. -9.55111111 e Lon.: -35.77027777 ), Palmeiras dos Índios (A327 - Lat.: -9.42027777 e Lon.: -36.62027777) e Pão de Açúcar (A323 - Lat.: -9.74916666 e Lon.: -37.43083332) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) que opera uma rede de estações meteorológicas automáticas/convencionais em todo o território nacional, serviram como base para validar as estimativas realizadas pelos modelos para o período analisado.

#### 4.4 Dados de precipitação base MERGE

Para validação dos resultados de precipitação obtidos pelo WRF-Solar foram analisadas as informações diárias do conjunto de dados MERGE (<http://ftp.cptec.inpe.br/modelos/tempo/MERGE/GPM/>), no qual consiste em uma técnica de fusão um produto disponibilizado pelo CPTEC/INPE, e sua geração ocorre pela combinação de estimativas de satélite com observações de pluviômetros (Rozante *et al.*, 2010), que é acumulado a cada 1200Z. Essa técnica é destinada a minimizar as incertezas acerca da precipitação associadas a interpolações em regiões com baixa densidade de pluviômetros. O MERGE foi descrito em Rozante *et al.*, (2010) utilizando o produto *TRMM Multisatellite Precipitation Analysis* (TMPA) como dados de satélite. Com a descontinuação do TRMM-TMPA e sua substituição pelo GPM-IMERG, a única adaptação necessária ao algoritmo foi a remoção de um número relativamente grande de pontos próximos a cada estação de observação, para preservar o raio de ação dessa estação. O produto MERGE segue

os seguintes passos. Primeiro, os dados pluviométricos são georreferenciados na grade do satélite. Em seguida, para locais próximos às estações pluviométricas, uma grade quadrada de  $5 \times 5$  de dados de satélite é removida. Por fim, todos os dados pluviométricos são interpolados, e quaisquer estimativas remanescentes de satélite são realizadas.

#### 4.5 Dados de Satélite do GOES-16

O GOES-16 (*Geostationary Operational Environmental Satellite*) é parte de uma nova geração de satélites geoestacionários desenvolvidos pela *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) e pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), na qual é atribuído em monitorar a atmosfera terrestre e o ambiente espacial, fornecendo dados cruciais para diversas aplicações científicas e operacionais. O mesmo foi lançado em novembro de 2016 e entrando em condições de operação nominal em dezembro de 2017, assumindo a posição  $75,2^\circ\text{W}$  de longitude e a uma altitude de aproximadamente 35,786 km (WMO/OSCAR, 2025), compreendendo a América do Norte, América Central e a América do Sul, além de parte do Oceano Atlântico e Pacífico.

O satélite leva a bordo seis instrumentos principais: *Advanced Baseline Imager* (ABI): Radiômetro avançado que fornece imagens radiométricas detalhadas da superfície terrestre, da atmosfera e das nuvens. Esse é o principal instrumento para o monitoramento de variáveis atmosféricas; *Geostationary Lightning Mapper* (GLM): Realiza medições de descargas elétricas, possibilitando o monitoramento de tempestades severas e melhorando as previsões de eventos climáticos extremos; *Solar Ultraviolet Imager* (SUVI): Telescópio ultravioleta que monitora a atividade solar, essencial para a previsão de eventos de clima espacial; *Extreme Ultraviolet and X-ray Irradiance Sensors* (EXIS): Sensores que medem a irradiância no ultravioleta extremo e raios X, fornecendo dados vitais sobre explosões solares; *Space Environment In-Situ Suite* (SEISS): Monitora fluxos de prótons, elétrons e íons pesados na magnetosfera, proporcionando informações sobre as interações entre o vento solar e o campo magnético da Terra; *Magnetometer* (MAG): Monitora o campo magnético no entorno espacial, fornecendo dados cruciais sobre o ambiente geomagnético.

#### 4.6 Métricas estatísticas utilizadas

Para assegurar a confiabilidade das métricas estatísticas, realizou-se uma qualificação dos dados, visando identificar e corrigir inconsistências e falhas nos dados observados, como

valores atípicos (*outliers*). Este processo foi crucial para garantir a integridade dos dados e a precisão das análises subsequentes.

A identificação de *outliers* se baseou no critério de três desvios padrão ( $3\sigma$ ), um método estatístico comum que pressupõe a distribuição normal dos dados. Calculou-se a média ( $\mu$ ) e o desvio padrão ( $\sigma$ ) para definir os limites superior ( $\mu + 3\sigma$ ) e inferior ( $\mu - 3\sigma$ ). Valores fora desse intervalo foram classificados como *outliers* e submetidos a análise detalhada.

A análise inicial revelou valores inconsistentes, como medições extremas que sugeriam falhas no equipamento ou erros de registro. Dados evidentemente errôneos foram removidos. *Outliers* potencialmente válidos, porém raros, foram investigados mais a fundo para determinar o tratamento adequado. Em alguns casos, esses *outliers* foram substituídos por valores representativos, como a média ou a mediana.

Após o processamento, registrou-se o número e a proporção de dados descartados, avaliando o impacto da qualificação. Essa etapa foi fundamental para minimizar distorções e garantir que as análises estatísticas fossem realizadas com dados confiáveis e representativos, evitando conclusões equivocadas.

Diversos estudos mostram as variedades de métricas estatísticas para investigar se os resultados modelados são compatíveis com os observados. A utilização desses indicadores pode ser consultada em Hanna e Paine (1988), Kitawaga (2018) entre outros. Nesse modo, no presente trabalho escolheram-se as seguintes métricas: Raiz do erro quadrático médio (REQM), Erro Médio Absoluto (EMA), Viés e Coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ); sendo  $y$  o valor observado e  $\bar{y}_i$  valor médio observado nas estações meteorológicas;  $x$  o valor simulado e  $\bar{x}_i$  valor médio simulado pelo WRF;  $\sigma$  é o desvio; e  $n$  o número total de observações.

O REQM (Equação 10) tem o objetivo de expressar a precisão dos resultados numéricos, quando comparado aos dados observados, com a vantagem ao apresentar valores do erro nas mesmas dimensões da variável abordada. Valores próximos a zero, indicam um desempenho melhor do modelo dado que as estimativas estão próximas dos valores observados em campo, é definida por:



$$REQM = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2} \quad (10)$$

O Erro Médio Absoluto (Equação 11) é a média da distância absoluta entre o valor observado e o previsto. Para levar em conta a periodicidade dos ângulos diedros, o MAE é calculado por:

$$EMA = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - Y_i) \quad (11)$$

N é o número total de resíduos, X representa o valor simulado e Y representa o valor observado.

O viés (Equação 12) é a medida simples da diferença entre os dados simulados e observado, indica a tendência apresentada pelo modelo em superestimar ou subestimar a variável em questão. Esta tendência, também chamada de erro sistemático, e é definida como:

$$viés = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i) \quad (12)$$

O coeficiente de correlação Pearson (r), é um parâmetro estatístico que expressa o quão fortemente estão relacionadas as amostras exemplos X e Y. Para fins descritivos, Devore (2009) relaciona como forte  $r \geq 0,8$ , moderada se  $0,5 < r < 0,8$ , e fraca se  $r \leq 0,5$ . O coeficiente de correlação Pearson é definido por:

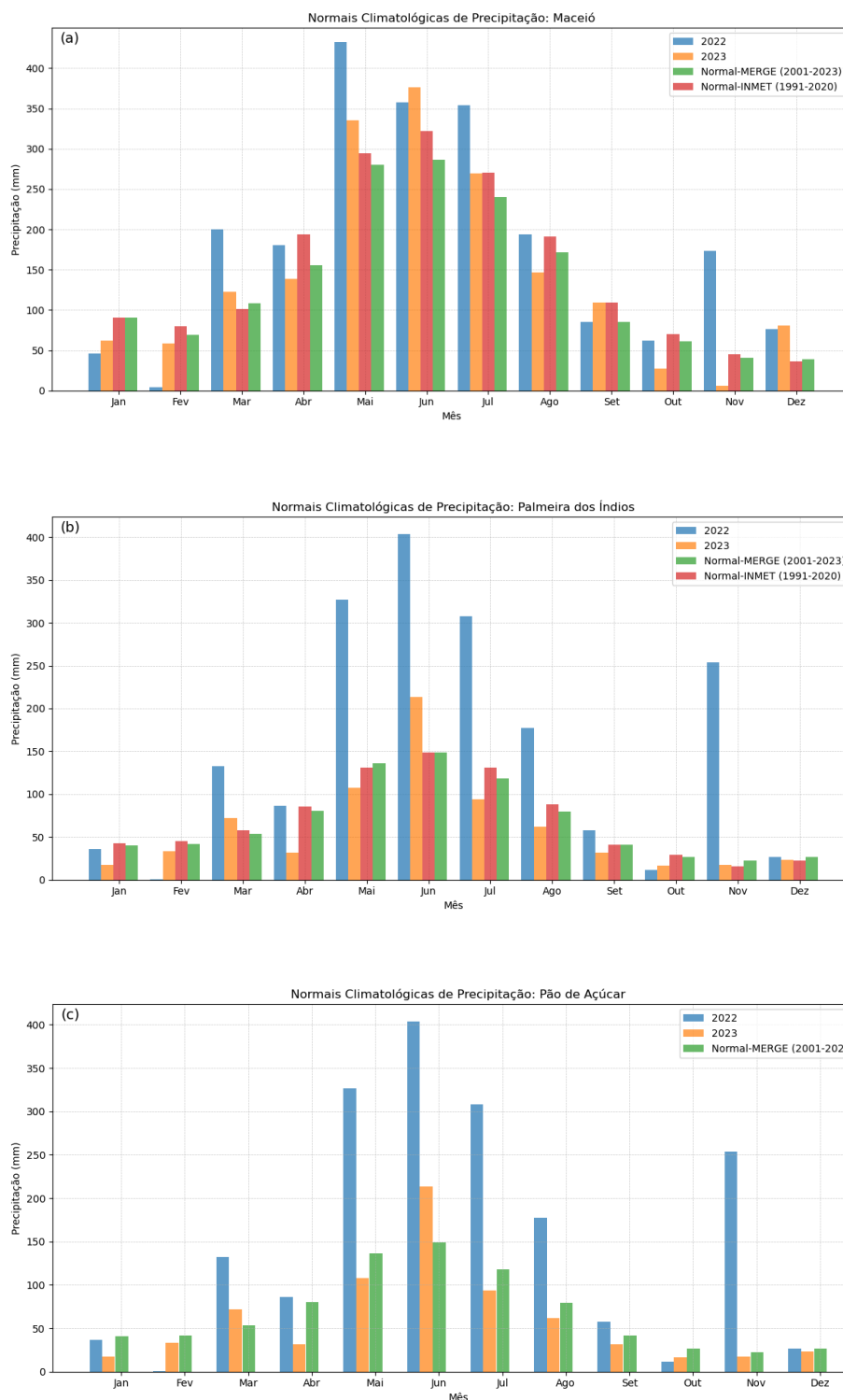
$$r = \frac{\sum_{i=1}^N [(x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad (13)$$

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise da intensidade da chuva entre os anos de 1991 e 2020 (normal climatológica do INMET), quando comparada aos anos de 2022 e 2023, revelou um padrão distinto, especialmente em 2022. As cidades de Maceió, Palmeira dos Índios e Pão de Açúcar apresentaram um período chuvoso mais longo e intenso, com destaque para os meses de março a agosto. Durante esse período, as três cidades registraram um aumento na precipitação em relação à média histórica. Em Maceió, a precipitação de 2022 foi 33,14% superior à média histórica, enquanto em Palmeira dos Índios e Pão de Açúcar, foi respectivamente 122,96% e 5,04% superior, para o mesmo ano. No entanto, em 2023, Pão de Açúcar e Palmeira dos Índios apresentaram uma redução na precipitação, com uma diminuição de -35,93% e -11,85%, respectivamente, por outro lado Maceió obteve 6,57% em relação à média histórica. Para essa análise, foram utilizados dois conjuntos de dados de normais climatológicas: a normal do INMET (1991-2022) e a normal do MERGE (2001-2023). Vale destacar que, para a cidade de Pão de Açúcar (Figura 7c), a ausência da normal climatológica do INMET impediu a comparação com o período de 1991 a 2020. Nesse caso, a normal do MERGE foi utilizada, a qual foi suficiente para representar o padrão de precipitação da região de forma adequada.

Esses resultados indicaram que, em 2022, houve um padrão de chuvas mais intenso e prolongado, especialmente em Maceió e Palmeira dos Índios, quando comparado aos períodos anteriores. Esse aumento significativo pode estar relacionado ao fenômeno de La Niña ocorrido em 2022 (Figura 8), o qual influenciou a circulação atmosférica, intensificando os fenômenos meteorológicos e, conseqüentemente, aumentando a nebulosidade e as precipitações na região. Além disso, é importante observar que a distribuição espacial da precipitação em Alagoas é heterogênea, com maiores volumes no litoral e menores no sertão. No entanto, em 2022, foi observado um padrão mais homogêneo de aumento das chuvas nas três cidades analisadas.

**Figura 7** - Regime de precipitação mensal nas cidades de Maceió (a), Palmeira dos Índios (b) e Pão de Açúcar (c), com as normais climatológicas (INMET 1991-2020), dados de 2022 e 2023, incluindo informações do MERGE.

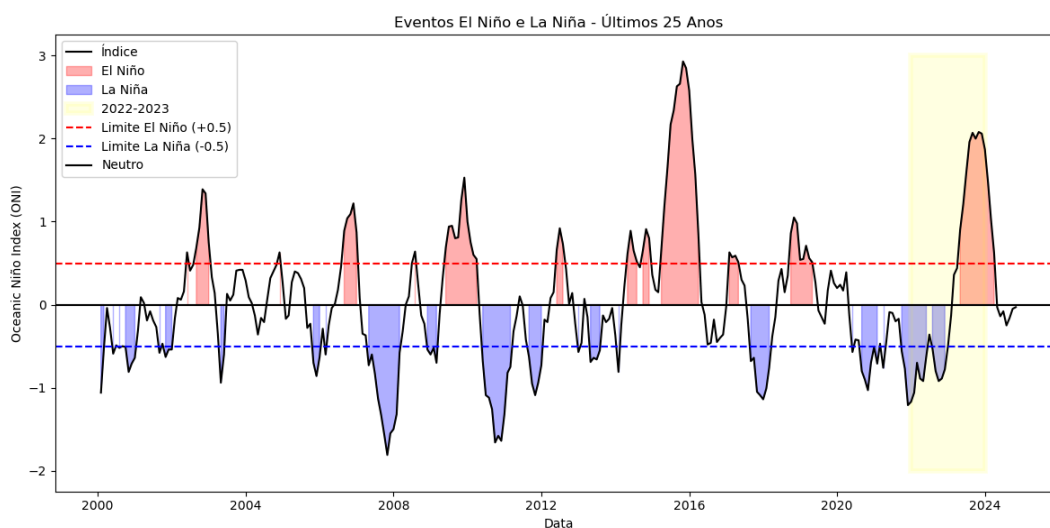


Em contraste, a menor precipitação registrada em 2023 no Nordeste brasileiro pode estar diretamente relacionada à intensificação do fenômeno El Niño. Este evento climático, caracterizado pelo aquecimento anormal das águas superficiais do Oceano Pacífico Equatorial, influencia os padrões de circulação atmosférica global, alterando a distribuição das chuvas em diversas regiões, incluindo o Nordeste. Esse evento climático pode ter

contribuído para a redução das chuvas, especialmente nas áreas do interior, como observado em Pão de Açúcar e Palmeira dos Índios.

A Figura 8 ilustra a variação do Índice Oceânico Niño (ONI em inglês - *Oceanic Niño Index*) ao longo dos últimos 25 anos e evidencia a natureza cíclica do fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENOS). O evento de 2023 se destaca por sua intensidade, figurando como um dos mais fortes registrados no período. A comparação com eventos históricos, como o de 2015, revela a magnitude do impacto do El Niño sobre os padrões de precipitação no Nordeste brasileiro. Esse fenômeno climático é responsável pela modificação dos sistemas atmosféricos que afetam a região. O aquecimento anormal das águas do Pacífico tropical enfraquece os sistemas frontais que costumam trazer umidade para o continente, resultando em um déficit de chuvas, especialmente nas regiões do Sertão e Agreste. Essa redução da precipitação em 2023 é um reflexo direto desse mecanismo, que tem contribuído para a diminuição das chuvas, como observado nas cidades de Pão de Açúcar e Palmeira dos Índios.

**Figura 8** - Variação do Índice Oceânico Niño (ONI) e fases do ENOS nos últimos 25 anos



A variabilidade climática na região tem sido amplamente influenciada pelos eventos extremos de ENOS. A análise da série histórica do Índice Oceânico Niño (ONI) (ver Figura 8) revela uma alternância entre períodos de seca e chuva, associados, respectivamente, aos eventos La Niña e El Niño. O período entre 2000 e 2006, por exemplo, foi caracterizado por uma frequência considerável de anos chuvosos, com destaque para 2000 (La Niña), 2002 (El Niño). Essa tendência contrasta com a década seguinte, que registrou maior incidência de

eventos La Niña, como em 2007 a 2008, 2010 ( a partir do trimestre de maio a julho) a 2012 (até o trimestre de março a maio).

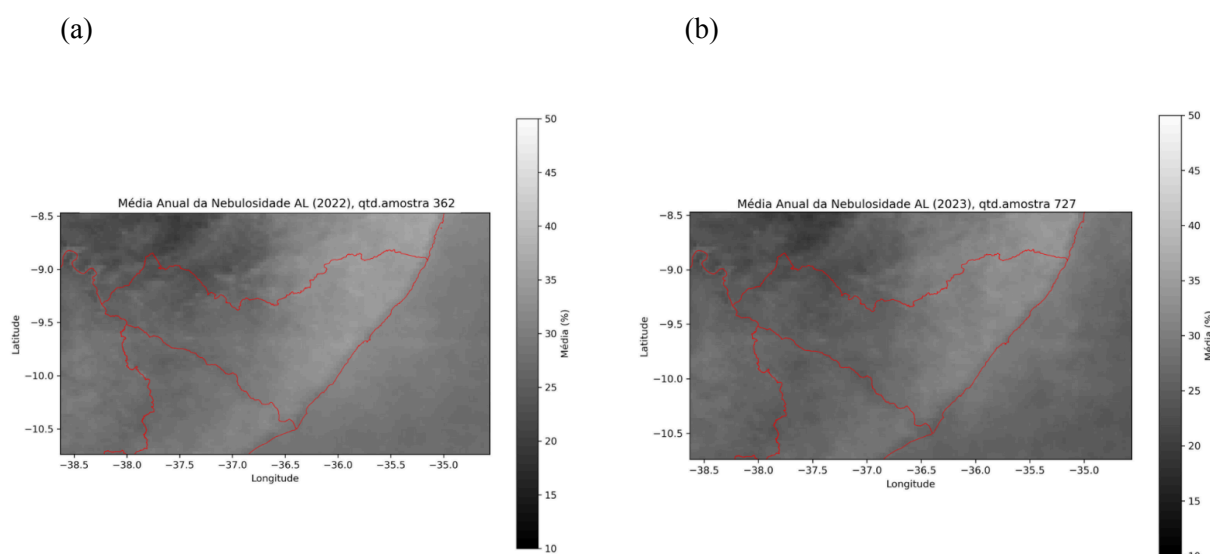
Estudos anteriores (Da Silva, 2004; Correia Filho *et al.*, 2019) evidenciam a influência do ENOS na variabilidade climática da região, especialmente no Leste do Nordeste, onde os eventos El Niño e La Niña determinam de forma cíclica, mas não repetitiva, os padrões de precipitação (Molion e Bernardo, 2002). Além dos ENOS, outros modos de variabilidade climática, como por exemplo a Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) e a Oscilação de Madden-Julian (OMJ), também têm impacto sobre a região (Da Silva *et al.*, 2010, 2020; Reboita *et al.*, 2010; Lyra *et al.*, 2017).

Considerando a possibilidade de haver nebulosidade sem precipitação, o que também pode afetar a diminuição da radiação solar devido à redução da profundidade óptica da atmosfera, é importante avaliar a cobertura de nuvens no Estado de Alagoas para o período em questão. A Figura 9 mostra uma maior quantidade de nuvens na região litorânea, em comparação com as áreas mais interioranas. Essa distribuição pode ser explicada por diversos fatores, como a influência dos ventos alísios, a orografia e a proximidade do oceano.

A região litorânea de Alagoas, especialmente a faixa mais próxima ao oceano, apresenta, em média, uma maior cobertura de nuvens ao longo do ano. Esse fenômeno é comum em regiões costeiras, devido à influência dos ventos alísios, que trazem umidade do oceano e favorecem a formação de nuvens (Repinaldo *et al.*, 2020; Lyra *et al.*, 2020). A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) também tem influência sobre o clima em Alagoas, muitas vezes indiretamente, por meio de "pulsos" de nebulosidade que se desprendem de sua área de maior atuação e se deslocam para o sul, atingindo o Estado (Hubert *et al.*, 1969; Uvo e Nobre, 1989; Ferreira, 1996; Xavier *et al.*, 2000; Coelho-Zanotti *et al.*, 2004).

Por outro lado, as áreas mais interioranas do Estado tendem a apresentar uma cobertura de nuvens menor, refletindo um clima mais seco e com menor frequência de chuvas. A nebulosidade varia significativamente em diferentes regiões de Alagoas, sendo influenciada por fatores como a altitude, a proximidade de corpos d'água e a orografia local.

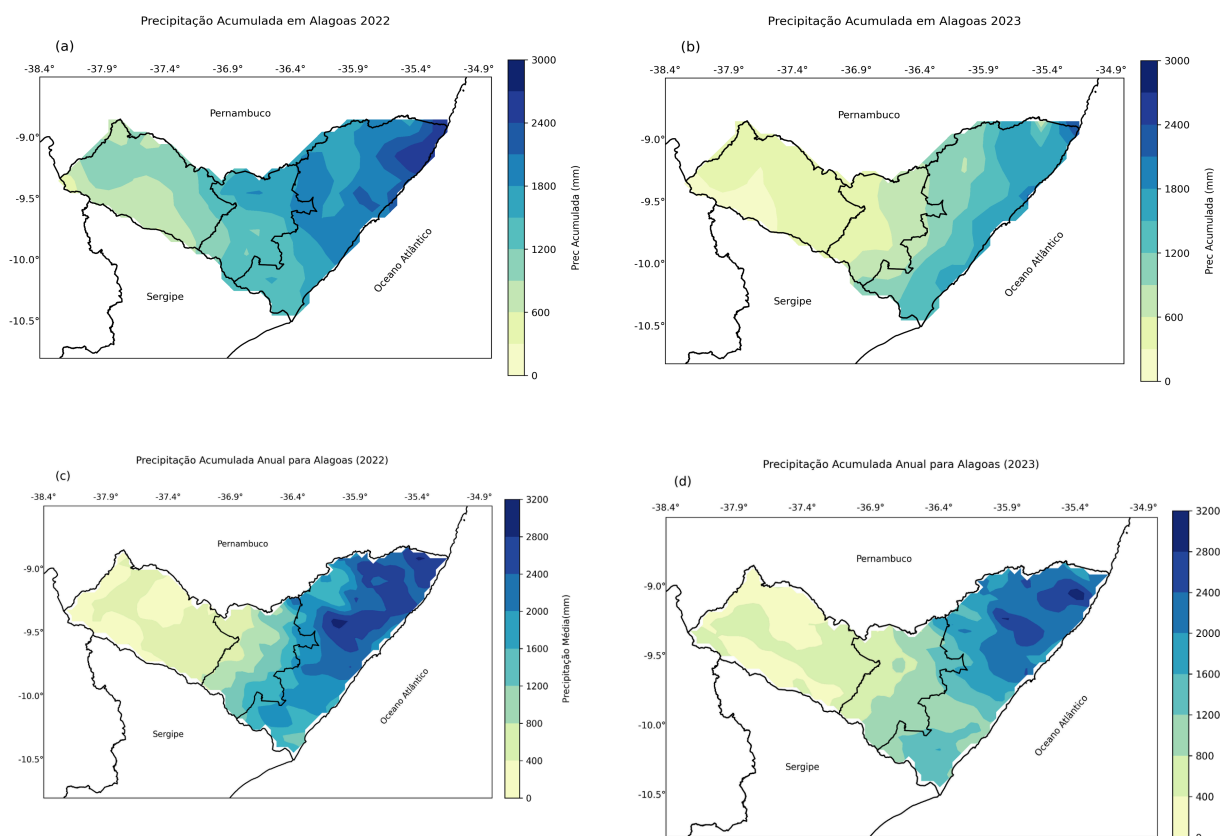
**Figura 9** - Média anual da nebulosidade para o estado de Alagoas, satélite GOES16, para os anos de 2022 (a) e 2023 (b)



A Figura 10 (a, b, c, d) apresenta a precipitação acumulada em Alagoas, com base em dados observacionais do MERGE e do modelo WRF-Solar, respectivamente, para os anos de 2022 e 2023. A análise dessas imagens revela padrões importantes sobre a distribuição e a variabilidade da precipitação.

Em todas as imagens, observa-se um gradiente bem definido na distribuição espacial da precipitação, com maiores volumes concentrados na região litorânea e uma diminuição gradual em direção ao interior, caracterizando um padrão leste-oeste. Ao comparar com o ano de 2022 (ver Figura 10a) demonstra que as áreas costeiras apresentaram acumulados de precipitação entre 2400 e 3000 mm, enquanto as regiões mais a oeste registraram valores entre 600 e 1200 mm, aproximadamente. Já para o ano de 2023 (Figura 10b), indica uma redução nos acumulados de precipitação na região costeira, em comparação com 2022, com valores entre 1800 e 2400 mm. O interior do Estado manteve valores semelhantes aos de 2022, entre 600 e 1200 mm.

**Figura 10** - Precipitação acumulada anual (mm) obtida com dados MERGE (a,b) e WRF-Solar (c,d) para os anos de 2022 e 2023



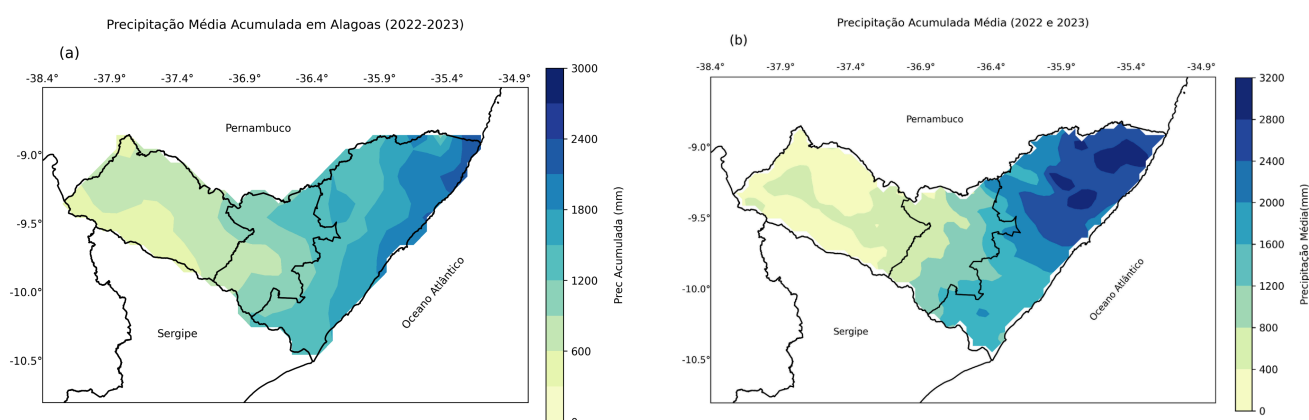
Ao considerar os dados de precipitação acumulada anual para Alagoas, com simulações realizadas pelo modelo WRF-Solar (figuras 10c, d), observam-se variações interanuais significativas. Em 2022, registrou-se uma maior concentração de chuva na região litorânea, com valores superiores a 2500 mm, confirmando que este ano foi considerado atípico. A distribuição espacial da precipitação segue o padrão leste-oeste, com diminuição dos índices pluviométricos em direção ao interior do Estado.

Em 2023 (Figura 10d), notou-se uma redução geral na precipitação em comparação com 2022, com diminuição da área representada por tons mais escuros de azul, que indicam as maiores quantidades de chuva. A intensidade do gradiente leste-oeste também parece ser menor em 2023. A análise das figuras 9 e 10 demonstra a forte influência da nebulosidade e dos dados de precipitação sobre a irradiância solar (figuras 13,14 e 15), em Alagoas. A maior precipitação observada em 2022, especialmente na região litorânea, provavelmente resultou em uma menor irradiância devido à maior cobertura de nuvens. Por outro lado, a menor precipitação em 2023 sugere uma maior irradiância, principalmente nas áreas que apresentaram maior redução na precipitação em relação ao ano anterior. Este padrão reforça a

importância de considerar a variabilidade interanual da precipitação e seus efeitos na nebulosidade para o planejamento e a otimização de sistemas de energia solar no Estado.

Um fator importante no regime de chuvas em Alagoas são as perturbações ondulatórias no Campo dos Ventos Alísios (POAs, Molion e Bernardo, 2002). Esses distúrbios, formados pela convergência dos ventos que acompanham os sistemas frontais com os ventos alísios, originam grande nebulosidade ao se aproximarem das áreas costeiras, devido à convergência do fluxo de umidade e ao contraste de temperatura entre oceano e continente. Além disso, sistemas mais localizados, como as brisas de terra e mar e a convecção local, também não podem ser descartados como mecanismos contribuintes para os totais pluviométricos observados no Estado.

**Figura 11** - Precipitação média acumulada anual (mm) para os anos de 2022 e 2023 proveniente do MERGE (a) e WRF-Solar (b)



A representação da média de precipitação acumulada entre 2022 e 2023 está apresentada na Figura 11, que suaviza as diferenças entre os dois anos, mostrando valores médios acumulados de precipitação entre 2000 e 2400 mm na costa e entre 600 e 1200 mm no interior, reforçando assim a persistência do gradiente leste-oeste de sua distribuição. Esses números evidenciam uma suavização das diferenças observadas entre os anos individuais, proporcionando um panorama geral da precipitação em Alagoas durante o período analisado, atenuando as variações interanuais e destacando os padrões climáticos persistentes. No entanto, é importante considerar as variações individuais de cada ano, conforme demonstrado nas Figuras 10 (a, b, c, d), para uma compreensão mais completa da dinâmica da precipitação na região.



Em resumo, as imagens do MERGE evidenciam a variabilidade interanual da precipitação em Alagoas, com 2022 apresentando maiores acumulados na costa em comparação com 2023. No entanto, o padrão espacial básico da precipitação – com maiores índices pluviométricos no litoral e menores no interior – permanece consistente ao longo dos dois anos e na média entre eles. Ao comparar os dados do MERGE com os do WRF-Solar, observa-se uma tendência de superestimação por parte do WRF-Solar, embora, no geral, as estimativas não se distanciam consideravelmente dos valores do MERGE.

A compreensão deste comportamento é fundamental para diversas atividades, como a agricultura, o abastecimento de água e o planejamento de recursos hídricos. Conforme destacado por Firmino *et al.*, (2024), a ocorrência do elevado quantitativo de precipitação média, na estação das chuvas, e os respectivos extremos estão predominantemente associados às condições oceânicas e suas relações com a atmosfera, como a atuação dos Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOL's) e o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS). Este padrão sazonal está relacionado à dinâmica dos sistemas atmosféricos que atuam na região Nordeste do Brasil, como a ZCIT e os ventos alísios. Além disso, Frentes Frias (FFs) podem atingir as latitudes mais baixas e produzir convecção organizada no inverno do Hemisfério Sul (Kousky, 1979). No NEB, os valores de precipitação também estão associados ao deslocamento da ZCIT durante abril (Utida *et al.*, 2019). Além disso, o Vórtice Ciclônico Troposférico Superior (VCTS), os Complexos Convectivos de Mesoescala (CCMs) e a convergência máxima dos ventos alísios do sudeste com a brisa terrestre em diferentes épocas do ano podem favorecer acumulações significativas de chuva na região (Repinaldo *et al.*, 2020; Lyra *et al.*, 2020).

A avaliação do desempenho do modelo WRF-Solar na simulação da precipitação em Alagoas foi realizada através da análise qualitativa com dados observados do MERGE para os anos de 2022, 2023 e a média acumulada entre esses anos. As análises revelaram importantes aspectos sobre a capacidade do modelo em representar a dinâmica da precipitação na região.

Um ponto positivo e consistente em todas as comparações é a similaridade no padrão espacial da precipitação. Tanto os dados do MERGE quanto as simulações do WRF-Solar demonstram claramente o gradiente leste-oeste característico de Alagoas, com maiores acumulados de chuva concentrados na faixa litorânea e uma diminuição gradual em direção ao interior do Estado. Isso indica que o modelo está capturando de forma satisfatória os principais mecanismos que controlam a distribuição espacial da precipitação na região.

No entanto, foram identificadas pequenas diferenças na magnitude da precipitação, principalmente na região costeira, isso se deve ao fato da resolução espacial ser diferente entre as bases de dados. Em ambos os anos analisados (2022 e 2023), o WRF-Solar tendeu a *superestimar* os valores de precipitação em comparação com os dados observados pelo MERGE. Essa superestimação é mais evidente nas áreas próximas ao litoral, onde as simulações apresentam acumulados consistentemente maiores do que os observados. No interior do Estado, a concordância entre os dados simulados e observados é geralmente melhor, com diferenças menos pronunciadas na magnitude da precipitação.

A análise da média da precipitação acumulada entre 2022 e 2023 reforça as observações anteriores. O padrão espacial continua sendo bem representado pelo WRF-Solar, mas a superestimação na região costeira persiste, embora de forma atenuada pela média. Em resumo, o WRF-Solar demonstra habilidade em reproduzir o padrão espacial da precipitação em Alagoas, mas apresenta uma tendência a superestimar a magnitude da chuva, especialmente na faixa litorânea. Essa diferença sugere a necessidade de investigações adicionais para identificar as possíveis causas da superestimação, que podem estar relacionadas a parametrizações físicas do modelo, resolução espacial, dados de entrada ou a representação de processos atmosféricos específicos da região.

### 5.1 Validação do Modelo WRF-Solar e Mapeamento Solarimétrico de Alagoas

No primeiro momento na utilização do modelo atmosférico, decidiu-se por verificar a eficiência do modelo WRF-Solar para realizar simulações da variável radiação solar, para as três mesorregiões climáticas do Estado Alagoas: Litoral (Maceió), Agreste (Palmeira dos Índios) e Sertão (Pão de Açúcar). Os resultados são apresentados em termos de média ( $\mu$ ) e desvio padrão ( $\sigma$ ) na tabela 3.

**Tabela 3** - Avaliação das simulações realizadas com o WRF-Solar, apresentando as Médias ( $\mu$ ) e Desvios Padrão ( $\sigma$ ) para a variável Radiação Solar em diferentes regiões de Alagoas, considerando as configurações WS-C1 e WS-C2 (WRF-Solar + configuração utilizada) e os dados observacionais do INMET

			$\mu$			$\sigma = 3$		
			WS-C1	WS-C2	INMET	WS-C1	WS-C2	INMET
	Quantidade de dados analisados	Percentual de dados rejeitados						
Litoral (Maceió)	15,996	0,010%	506,57	<b>413,86</b>	427,25	337,65	<b>292,34</b>	291,58
Agreste (Palmeiras dos Índios)	14,242	0,028%	511,89	<b>497,98</b>	468,93	333,34	<b>329,05</b>	288,36
Sertão (Pão de Açúcar)	12,909	0,012%	550,72	<b>550,04</b>	492,58	330,45	<b>337,96</b>	315,13

A tabela anterior apresenta uma tendência geral do modelo WRF-Solar em superestimar a radiação solar nas três regiões, independentemente da configuração utilizada. Essa superestimação é evidenciada pela comparação das médias ( $\mu$ ) obtidas pelo WRF-Solar com as médias correspondentes dos dados observacionais do INMET.

No Litoral, a configuração WS-C1 do WRF-Solar apresentou uma média de 506,57 W/m<sup>2</sup>, enquanto o INMET registrou 427,25 W/m<sup>2</sup>. A configuração WS-C2, por sua vez, apresentou uma média de 413,86 W/m<sup>2</sup>, que se mostrou mais próxima da observação do INMET (427,25 W/m<sup>2</sup>). Em ambas as configurações, os desvios padrão indicam maior variabilidade nos dados simulados (337,65 W/m<sup>2</sup> e 292,34 W/m<sup>2</sup> para WS-C1 e WS-C2, respectivamente) em comparação com os dados observados do INMET (291,58 W/m<sup>2</sup> em ambos os casos).

De forma semelhante ao Litoral, o WRF-Solar superestimou a radiação solar no Agreste, com médias de 511,89 W/m<sup>2</sup> (WS-C1) e 497,98 W/m<sup>2</sup> (WS-C2), em comparação com a média do INMET, que é de 468,93 W/m<sup>2</sup>. A configuração WS-C2 novamente apresentou resultados mais próximos aos dados observacionais. No Sertão, ambas as configurações do WRF-Solar superestimaram significativamente a radiação solar, com médias de 550,72 W/m<sup>2</sup> (WS-C1) e 550,04 W/m<sup>2</sup> (WS-C2), respectivamente, enquanto o INMET registrou 492,58. Essa superestimação, embora similar entre as duas configurações, é

consideravelmente maior em relação às outras regiões. A variabilidade dos dados simulados segue o mesmo padrão, com maior dispersão (330,45 W/m<sup>2</sup> e 337,96 W/m<sup>2</sup>) em comparação com os dados observados (315,13 W/m<sup>2</sup>).

A configuração WS-C2 do WRF-Solar apresentou um desempenho aproximadamente 2% melhor em termos de aproximação às observações do INMET, especialmente nas regiões do Litoral e Agreste. Contudo, a superestimação geral observada, principalmente no Sertão, aponta para a necessidade de uma investigação adicional para identificar possíveis fontes de erro, como a influência da topografia complexa da região e a escolha das parametrizações físicas utilizadas no modelo.

A tabela abaixo demonstra a avaliação do desempenho preditivo das configurações utilizadas, WS-C1 e WS-C2. Os parâmetros estatísticos utilizados para realizar a análise da eficiência das configurações foram o coeficiente de correlação de Pearson, REQM, Viés e EMA, para quantificar a precisão das simulações realizadas.

**Tabela 4** - Comparação do desempenho das configurações C1 e C2 do WRF-Solar na simulação de radiação utilizando diferentes métricas estatística (r, REQM, Viés e EMA)

Região	r		REQM		Viés		EMA	
	C1	C2	C1	C2	C1	C2	C1	C2
Litoral (Maceió)	0,82	0,74	208,07	<b>207,77</b>	79,32	<b>-13,13</b>	152,12	152,13
Agreste (Palmeiras dos Índios)	0,79	<b>0,80</b>	208,26	<b>197,73</b>	43,10	<b>29,38</b>	158,29	<b>151,72</b>
Sertão (Pão de Açúcar)	0,83	<b>0,86</b>	191,05	<b>181,33</b>	47,27	57,75	144,05	<b>134,80</b>

A configuração WS-C2 demonstra um desempenho superior à configuração WS-C1 na maioria das métricas e regiões. As correlações entre os dados simulados e observados são consistentemente elevadas para ambas as configurações, indicando uma boa concordância na

variação temporal da variável. De acordo com a classificação proposta por Devore (2009), correlações são consideradas fortes quando  $r \geq 0,8$ , moderadas quando  $0,5 < r < 0,8$  e fracas quando  $r \leq 0,5$ .

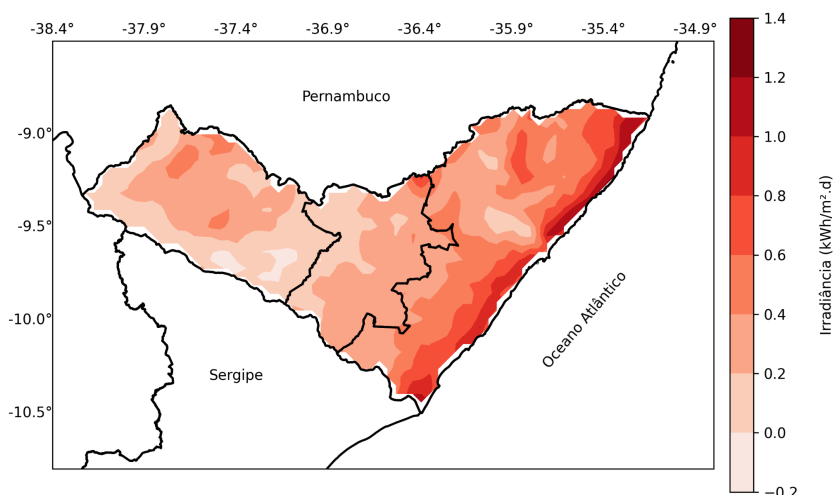
No presente estudo, as estatísticas obtidas para a configuração WS-C2 apresentaram coeficientes de correlação de 0,70, 0,80 e 0,86, indicando correlações predominantemente moderadas a fortes entre as estimativas do modelo WRF-Solar e os dados observados. Esses valores sugerem que o modelo é capaz de capturar, com boa precisão, as variações da radiação solar horária nas regiões analisadas. No entanto, diferenças importantes são observadas nas outras métricas, principalmente no REQM e no Viés.

Ao comparar as configurações WS-C1 e WS-C2 no Litoral, observou-se que WS-C2 apresentou um desempenho ligeiramente melhor, com um REQM menor. Enquanto C1 tendia a superestimar a variável, com um viés positivo de 79,32, WS-C2 apresentou um viés negativo de -13,13, indicando uma subestimação mais moderada. No Agreste, o padrão se repetiu, com WS-C2 apresentando um REQM e um viés menor. No Sertão, WS-C2 manteve o menor REQM e EMA, porém apresentou um viés ligeiramente maior que WS-C1, embora ambas as configurações tenham superestimado a variável.

A configuração WS-C2 apresentou um melhor desempenho, indicando menor magnitude dos erros e previsões mais consistentes. Portanto, para as análises subsequentes, foi utilizada a configuração WS-C2, priorizando a acurácia estatística. Embora ambas as configurações possam apresentar discrepâncias dependendo da região, a configuração WS-C2 demonstrou ser mais confiável estatisticamente.

A Figura 12 apresenta um mapa de diferenças entre as simulações de irradiação solar das configurações WS-C1 e WS-C2, calculadas como a diferença entre os valores de WS-C1 e WS-C2 (em kWh/m<sup>2</sup>.d). Observa-se que a configuração WS-C1 tende a superestimar a irradiância, principalmente na região litorânea, onde as diferenças podem chegar a 10% em relação à configuração WS-C2. Essa discrepância pode estar relacionada à maior ocorrência de nebulosidade na região litorânea, que não é perfeitamente representada pelos modelos. No interior do Estado, as configurações apresentam maior concordância, sugerindo que os modelos capturam de forma mais precisa a variabilidade da radiação solar nessas regiões.

**Figura 12** - Comparação entre os resultados da simulação de Irradiação utilizando as figuras C1 e C2 do WRF-Solar



A comparação entre as configurações WS-C1 e WS-C2 revela que a ativação da parametrização de nuvens rasas de Deng na configuração WS-C2, proposta por Deng et al. (2003), foi determinante para melhorar a representação da nebulosidade, especialmente na região litorânea. Essa melhoria resultou em uma maior concordância entre as simulações de WS-C2 e as observações, justificando sua escolha para este estudo. Os resultados destacam a importância de selecionar cuidadosamente as parametrizações físicas dos modelos numéricos, a fim de capturar as características específicas de cada região e obter simulações mais precisas da radiação solar.

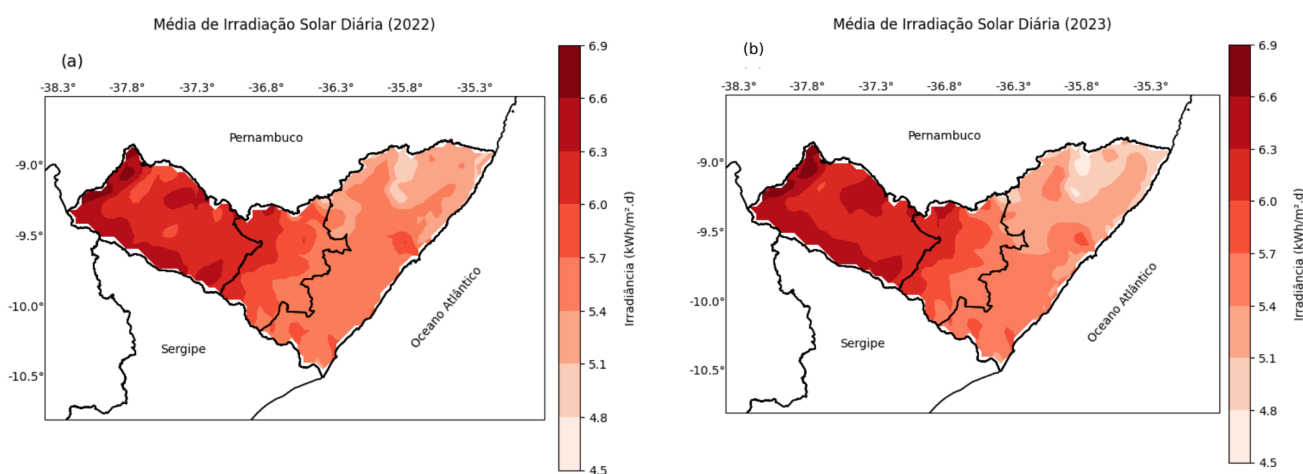
Jeworrek *et al.*, (2019) em uma revisão abrangente das parametrizações de cúmulos e microfísica na zona cinzenta convectiva, obtiveram melhores resultados para simulações de alta resolução com a parametrização de cúmulos ativada, mas alertam que detalhes em pequena escala e ruídos podem contribuir para a redução da capacidade de previsão, e, portanto, cada configuração de modelo deve ter sua própria avaliação. Outros estudos mostraram que ativar a parametrização de cúmulos para alta resolução pode melhorar a previsão de precipitação (On *et al.*, 2018; Gao *et al.*, 2017), enquanto outros demonstraram melhorias significativas na convecção calculada explicitamente em regiões de terreno complexo e melhorias menos significativas em regiões planas (Wagner *et al.*, 2018).

As Figuras 13 (a,b) apresentam a média de irradiação solar diária em Alagoas para os anos de 2022 e 2023, respectivamente. A análise comparativa das imagens revela um padrão espacial de distribuição da irradiação bastante semelhante entre os dois anos, com as maiores incidências no sertão e as menores no litoral e leste do Agreste. As variações interanuais

observadas podem estar relacionadas a eventos climáticos de grande escala, como os ENOS, explicados anteriormente.

O ano de 2022, marcado pela influência da La Niña, apresentou um padrão de chuvas mais intenso e prolongado, especialmente em Maceió e Palmeira dos Índios. A maior nebulosidade associada à esse evento pode ter contribuído para a redução da irradiância solar, especialmente na região litorânea. Em contrapartida, o ano de 2023, sob influência do El Niño, apresentou menores índices de precipitação, resultando em um aumento geral da irradiância solar, especialmente na região do sertão, essa variação é de aproximadamente 4,5 a 6,9 kWh/m<sup>2</sup>.d. É importante destacar que a distribuição espacial da precipitação em Alagoas é heterogênea, com maiores valores no litoral e menores no sertão. No entanto, em 2022, observou-se um padrão mais homogêneo de aumento das chuvas nas três cidades analisadas, sugerindo uma influência mais ampla da La Niña na região.

**Figura 13** - Irradiância solar diária em Alagoas para os anos de 2022 (a) e 2023 (b)



A Figura 14 revela pequenas, mas significativas variações espaciais na irradiância solar entre 2022 e 2023. O ano de 2022, marcado por um regime chuvoso excepcional devido ao fenômeno La Niña (ver Figura 8), apresentou uma irradiância solar ligeiramente menor, especialmente nas regiões litorâneas. A maior nebulosidade associada ao regime chuvoso, corroborada pela Figura 9 que mostra a cobertura de nuvens, contribuiu para a redução da irradiância nessas áreas.

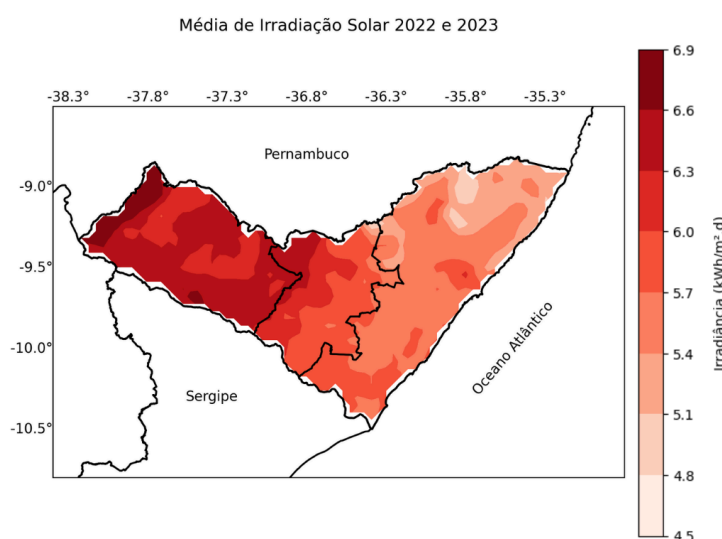
Ainda com base na Figura 14, há um gradiente espacial na distribuição da irradiância solar em Alagoas. A região do sertão, com valores médios próximos a 6,5 kWh/m<sup>2</sup>.d,

apresenta a maior incidência solar. Em contraste, o agreste e o litoral, com valores em torno de 4,5 a 5,7 kWh/m<sup>2</sup>.d, apresentam menor irradiância.

Este padrão espacial reflete a influência de fatores geográficos e climáticos, como a altitude, a proximidade com o oceano e a topografia. A região do sertão recebe maior incidência solar devido a menor nebulosidade ou menor influência da brisa marítima, como mostrado na Figura 8. Isto pode ser explicado devido a presença do Planalto da Borborema na região em transição com a zona da mata que age como barreira topográfica promovendo a convergência dos ventos alísios de Sudeste, proporcionando menos chuvas no sertão (menor nebulosidade) e mais chuvas no litoral alagoano (maior nebulosidade) (BARROS *et al.*, 2012; MOURA *et al.*, 2020).

Em geral, áreas com uma irradiância solar média anual superior a 4 kWh/m<sup>2</sup>.d (SECTI, 2018) são consideradas favoráveis para a instalação de sistemas fotovoltaicos. No Brasil, por exemplo, o Atlas Brasileiro de Energia Solar do INPE fornece dados detalhados sobre os níveis de irradiação mensal para diversas localidades, ajudando a dimensionar sistemas fotovoltaicos de acordo com o potencial solar da região (Pereira et al., 2017; INPE, 2021).

**Figura 14** - Média da irradiância solar diária em Alagoas para o período de 2022 a 2023



O comportamento sazonal da irradiância solar em Alagoas está presente na Figura 15. observa-se uma clara variação ao longo do ano, com os maiores valores concentrados no verão (dezembro a fevereiro) e os menores no inverno (junho a agosto).

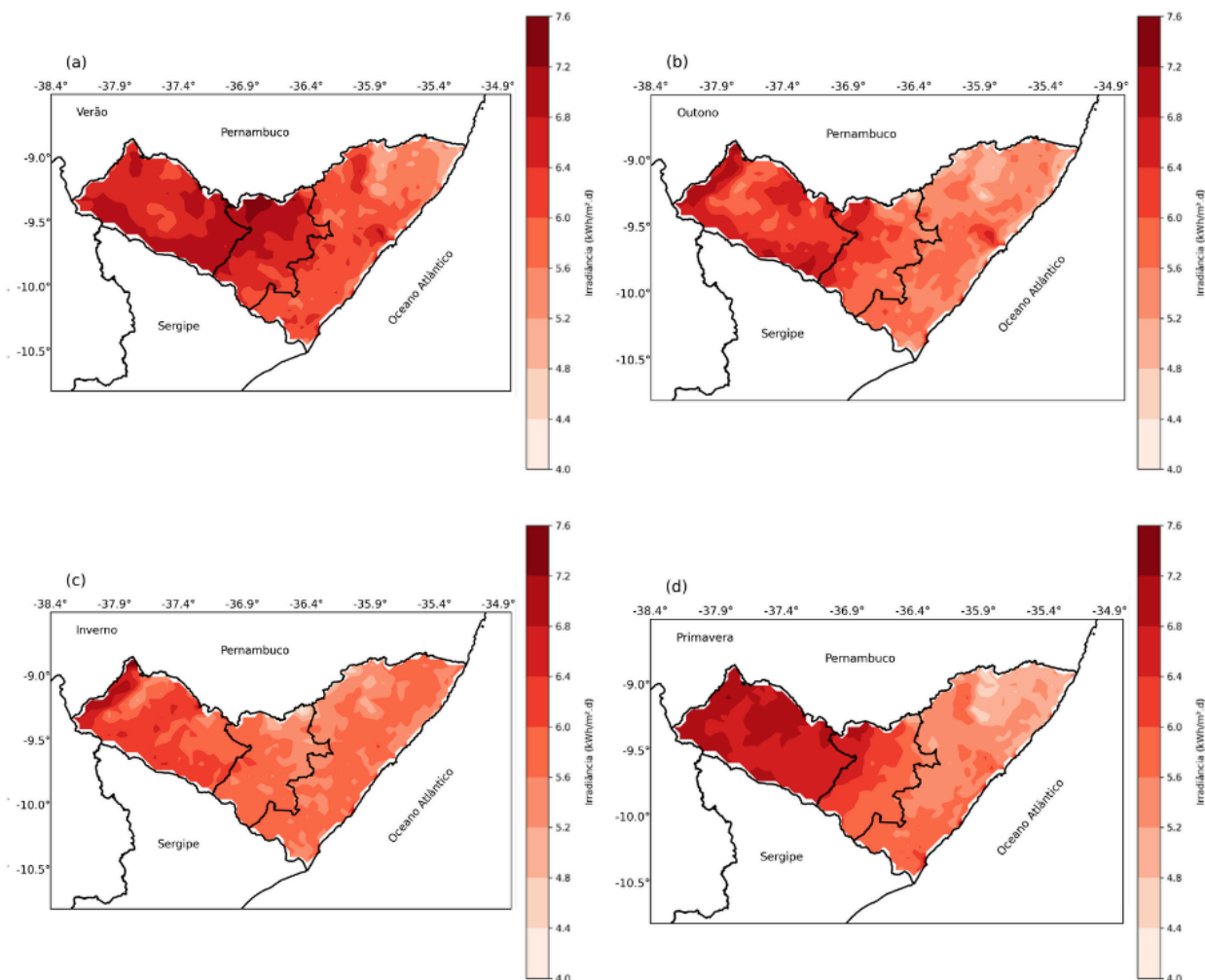


No verão, a irradiância atinge seus picos máximos, com valores superiores a (6,8 kWh/m<sup>2</sup>.d) em grande parte do Estado, chegando a atingir (7,2 kWh/m<sup>2</sup>.d) nas áreas de maior incidência, localizadas principalmente no sertão e uma parte do Agreste. A partir do outono (Março a Maio), a irradiância começa a diminuir gradualmente, com o surgimento de variações regionais mais evidentes.

Já para o inverno, a irradiância apresenta os menores valores, com médias em torno de 5,2 kWh/m<sup>2</sup>.d e valores mínimos de 4,0 kWh/m<sup>2</sup>.d em algumas áreas na região litorânea e Agreste. A variação regional é mais acentuada nesta estação, com diferenças significativas entre as áreas. Na primavera (setembro a novembro), a irradiância volta a aumentar, com valores médios em torno de 6,0 kWh/m<sup>2</sup>.d, representando uma transição para o verão.

Este padrão sazonal está diretamente relacionado à aparente inclinação do sol em relação à Terra ao longo do ano e à influência de fatores climáticos regionais, como a nebulosidade. A compreensão deste comportamento sazonal é fundamental para o planejamento e a otimização de sistemas de energia solar em Alagoas, permitindo o dimensionamento adequado das instalações e a previsão da geração de energia ao longo do ano.

**Figura 15** - Distribuição espacial da irradiação solar em Alagoas durante as diferentes estações do ano: (a) verão, (b) outono, (c) inverno, (d) primavera



O Estado de Alagoas, com sua rica diversidade geográfica, apresenta um cenário promissor para a geração de energia solar. A região do Sertão, em particular, se destaca como a mais privilegiada, com os mais altos níveis de irradiância solar do Estado. Essa condição a torna um local ideal para a instalação de grandes usinas fotovoltaicas, capaz de suprir uma parcela significativa da demanda energética da região. No entanto, o potencial solar de Alagoas não se restringe ao sertão. O agreste e o litoral, apesar de apresentarem níveis de irradiância ligeiramente inferiores, ainda oferecem condições favoráveis para a geração de energia solar. A escolha da tecnologia fotovoltaica mais adequada e o dimensionamento correto dos sistemas devem levar em consideração as particularidades de cada região, como a inclinação do terreno, a orientação dos painéis e as condições climáticas locais.

É importante ressaltar que a irradiância solar é apenas um dos fatores que influenciam a produção de energia fotovoltaica. A inclinação e a orientação dos painéis, a temperatura

ambiente e a disponibilidade de recursos hídricos para refrigeração também desempenham um papel crucial no desempenho dos sistemas. A exploração do potencial solar de Alagoas exige um planejamento cuidadoso e integrado. É fundamental realizar estudos detalhados para identificar os locais mais adequados para a instalação de sistemas fotovoltaicos, considerando aspectos como a topografia, a vegetação, a infraestrutura local e a demanda energética da região. Além disso, é preciso implementar políticas públicas que incentivem a geração de energia solar, como linhas de crédito específicas, redução de impostos e simplificação dos processos de licenciamento.

## 6 CONCLUSÃO

A análise abordada durante o estudo evidenciou a relação clara entre regimes climáticos, topografia e distribuição da radiação solar em Alagoas. Os fenômenos climáticos El Niño e La Niña tiveram impacto direto na variação da irradiância, especialmente em anos com precipitação atípica.

Em 2022, a maior cobertura de nuvens no litoral, associada aos fatores meteorológicos e à influência de La Niña, resultou em uma redução na quantidade de radiação solar que atingiu a superfície na região. Em contrapartida, em 2023, com condições climáticas mais favoráveis, observou-se um aumento na radiação solar.

O modelo WRF-Solar foi eficiente para mapear a distribuição espacial e temporal da irradiância solar, capturando padrões sazonais e a influência da topografia. O modelo demonstrou alta eficiência ao capturar os padrões sazonais da irradiância global horizontal. A análise estatística indicou correlações significativas para as diferentes regiões: Maceió ( $r = 0,74$ ), Palmeiras dos Índios ( $r = 0,80$ ) e Pão de Açúcar ( $r = 0,86$ ). Embora os resultados apresentem boa precisão, observou-se uma superestimação da irradiância em algumas áreas.

Alagoas apresenta grande potencial para exploração de energia solar, com o sertão mostrando níveis mais elevados e estáveis de irradiância. O sertão tem valores médios acumulados próximos a  $6,5 \text{ kWh/m}^2\text{.d}$ , enquanto o agreste e o litoral variam de  $4,5$  a  $5,7 \text{ kWh/m}^2\text{.d}$ . Sendo mais alta durante o verão (dezembro a fevereiro) e mais baixa no inverno (junho a agosto).

Durante o verão, a irradiância pode atingir picos acima de 6,8 kWh/m<sup>2</sup>.d, chegando a 7,2 kWh/m<sup>2</sup>.d em áreas do sertão. O outono e inverno apresentam diminuições na irradiância, com médias em torno de 5,2 kWh/m<sup>2</sup>.d no inverno.

A inclinação do sol e fatores climáticos regionais, como nebulosidade e a atuação da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), influenciam os padrões sazonais de irradiância global horizontal. O sertão apresenta menor influência da ZCIT, resultando em maior constância na irradiância ao longo do ano.

As etapas futuras de pesquisa podem envolver a validação dos resultados obtidos pelo WRF-Solar com dados de irradiância solar medidos no local, além da integração com outras ferramentas e dados de satélite para aprimorar a precisão das simulações. Também seria interessante analisar cenários futuros de mudanças climáticas e como eles podem impactar a variabilidade da irradiância solar em Alagoas, considerando a crescente importância da energia solar para o Estado. Em suma, esta pesquisa contribui para o avanço do conhecimento sobre a variabilidade da radiação solar em Alagoas e destaca a importância de considerar os fatores climáticos e geográficos no planejamento e desenvolvimento de sistemas de energia solar. Os resultados obtidos podem subsidiar futuras pesquisas, assim como auxiliar o desenvolvimento de políticas públicas que incentivem a utilização de fontes de energia renováveis no Estado.

## REFERÊNCIAS

- ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Sistema de Informações de Geração da ANEEL - SIGA. 2025. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br>. Acesso em: 24 fev. 2025.
- ARAKAWA, A. The cumulus parameterization problem: Past, present, and future. *Journal of Climate*, v. 17, p. 2493–2525, 2004.
- ATLAS BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR. 2ª ed. São José dos Campos: INPE, 2017. Disponível em: [http://labren.ccst.inpe.br/atlas\\_2017.html](http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html). Acesso em: jan. 2024.
- ATLAS SOLAR: Bahia. Governo do Estado da Bahia, 76 p., 2018.
- ÁVILA, A.; JUSTINO, F.; WILSON, A.; BROMWICH, D.; AMORIM, D. Recent precipitation trends, flash floods and landslides in southern Brazil. *Environmental Research Letters*, v. 11, p. 1–13, 2017.
- BARROS, A. H. C.; ARAÚJO, J. C. F.; SILVA, A. B.; SANTIAGO, G. A. C. F. Climatologia do Estado de Alagoas. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, EMBRAPA Solos, 211, p. 32, 2012
- BEZERRA, FRANCISCO DINIZ. Energia Solar. Caderno Setorial ETENE, n. 295, p. 1-14, 2023. Disponível em: [https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/1849/1/2023\\_CDS\\_295.pdf](https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/1849/1/2023_CDS_295.pdf). Acesso em: fev. 2024.
- CAVALCANTE, I. B. S.; SILVA, D. F. Período de retorno de eventos extremos em Alagoas e suas causas climáticas. *Revista Mineira de Recursos Hídricos*, v. 2, p. e021007-e021007, 2021.
- CAVALCANTI, I.F.A.; FERREIRA, N.J.; SILVA, M.G.A.; SILVA DIAS, M.A.F. Tempo e Clima no Brasil. ed. Oficina de Textos, São Paulo, 2009.
- COELHO-ZANOTTI, M. S. S. ; GAN, M. A. ; CONFORTE, J. C. . Estudo Da Variabilidade Da Posição E Da Nebulosidade Associada À ZCIT do Atlântico, Durante a Estação Chuvosa de 1998 e 1999 no Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 19, p. 23-34, 2004.
- COHEN, A. E.; CAVALLO, S. M.; CONIGLIO, M. C.; BROOKS, H. E. A review of planetary boundary layer parameterization schemes and their sensitivity in simulating southeastern U.S. cold season severe weather environments. *Weather Forecast*, v. 30, p. 591–612, 2015.
- CORREIA FILHO, W.L.F.; SANTIAGO, D.B.; OLIVEIRA JÚNIOR, J.F.; SILVA JUNIOR, C.A. Impact of urban decadal advance on land use and land cover and surface temperature in the city of Maceió, Brazil. *Land Use Pol.* 87, 104026, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104026>.
- DA SILVA, D.F.; LIMA, M.J.S.; SOUZA NETO, P.F.; GOMES, H.; SANTOS SILVA, F.D.; ALMEIDA, H.R.R.C.; PEREIRA, M.P.S.; COSTA, R.L. Caracterização de eventos extremos e de suas causas climáticas com base no Índice Padronizado de Precipitação Para o Leste do

Nordeste. *Revista Brasileira de Geografia Física* 13 (2), 449–464, 2020. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.2.p449-464>.

DA SILVA, C. A.; FARIAS, R. B.; OLIVEIRA, A. A. Eventos extremos de precipitação na região Nordeste do Brasil: padrões climatológicos e anomalias associadas. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 25, p. 101–119, 2019.

DA SILVA, D.F., SOUSA, F.A.S., KAYANO, M.T. Escalas Temporais da Variabilidade Pluviométrica na Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú. *Revista Brasileira de Meteorologia* 25 (3), 147–155, 2010. <https://doi.org/10.1590/S010277862010000300004>.

DA SILVA, V. P. R. On climate variability in Northeast of Brazil. *Journal of Arid Environments*, 58(4), 575-596. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2003.12.002>, 2004.

DASARI, H. P., S. DESAMSETTI, S. LANGODAN, R. ATTADA, R. K. KUNCHALA, Y. VISWANADHAPALLI, O. KNIO, AND I. HOTEIT. High resolution assessment of solar energy resources over the Arabian Peninsula. *Appl. Energy*, **248**, 354–371, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.105>.

DENG, A.; GAUDET, B.; DUDHIA, J.; ALAPATY, K. Implementation and Evaluation of a New Shallow Convection Scheme in WRF. *Anais do 94th American Meteorological Society Meeting, 22nd Conference on Numerical Weather Prediction, Atlanta, GA*, 2014.

DE MEDEIROS, E. S.; DE LIMA, R. R.; DE OLINDA, R. A.; DOS SANTOS, C. A. C. Modeling spatiotemporal rainfall variability in Paraíba, Brazil. *Water*, v. 11, p. 1843, 2019.

DE SOUSA STILPEN, D. V.; CHENG, V. Solar fotovoltaics in Brazil: A promising renewable energy market. In: 2015 3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC). IEEE, p. 1-5, 2015.

DEVORE, J. L. (2009). Probabilidade e estatística para engenharia e ciências.

DUHDIA, J., GILL, D., MANNING, K., WANG, W., BRUYERE, C. PSU/NCAR Mesoscale Modeling System Tutorial Class Notes and Users' Guide (MM5 Modeling System) Version 3. 2005.

FALASCA, S.; GANDOLFI, I.; ARGENTINI, S.; BARNABA, F.; CASASANTA, G.; DI LIBERTO, L.; PETENKO, I.; CURCI, G. Sensitivity of near-surface meteorology to PBL schemes in WRF simulations in a port-industrial area with complex terrain. *Atmospheric Research*, v. 264, p. 105824, 2021.

FEDOROVA, N.; LEVIT, V. Adverse meteorological phenomena in Northeast Brazil. Newcastle upon Tyne: Cambridge Scholars Publishing, 2023.

FEDOROVA, N.; LEVIT, V.; CRUZ, C. D. On frontal zone analysis in the tropical region of the Northeast Brazil. *Pure and Applied Geophysics*, v. 173, p. 1403–1421, 2016.

FERREIRA, N. S. Zona de Convergência Intertropical. *Climanálise*. In: *Climanálise (Org). Boletim de Monitoramento e Análise Climática. Edição Especial de 10 anos MCT/INPE*. Cachoeira Paulista, SP. 1996. 235 p.

FIRMINO, M. V. S. L.; RODRIGUES, D. T.; CABRAL JÚNIOR, J. B. Climatologia dos eventos extremos de precipitação em Maceió, Alagoas. *Revista Contexto Geográfico*, Maceió, v. 9, n. 22, p. 96-106, 2024. ISSN 2595-7236.

GAMARRO, H.; GONZALEZ, J. E.; ORTIZ, L. E. Urban WRF-Solar Validation and Potential for Power Forecast in New York City. In: *Energy Sustainability*. American Society of Mechanical Engineers, 2018.

GAO, L.; WEI, J.; LEI, X.; MA, M.; WANG, L.; GUAN, X.; LIN, H. Simulation of an extreme precipitation event using ensemble-based WRF model in the Southeastern Coastal Region of China. *Atmosphere*, v. 13, p. 194, 2022.

GAO, Y.; LEUNG, L. R.; ZHAO, C.; HAGOS, S. Sensitivity of U.S. summer precipitation to model resolution and convective parameterizations across gray zone resolutions. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 122, p. 2714–2733, 2017.

GEBRECHORKOS, S. H.; PAN, M.; BECK, H. E.; SHEFFIELD, J. Performance of state-of-the-art C3S European seasonal climate forecast models for mean and extreme precipitation over Africa. *Water Resources Research*, v. 58, e2021WR031480, 2022.

GENTILE, S. et al. 3D-VAR Data Assimilation of SEVIRI Radiances for the Prediction of Solar Irradiance in Italy Using WRF Solar Mesoscale Model Preliminary Results. *Remote Sensing*, v. 12, n. 6, p. 920, 2020.

GETTELMAN, A.; ROOD, R. B. *Demystifying Climate Models: A Users Guide to Earth System Models*. 1. ed. Heidelberg, Germany: Springer Open, 2016. ISBN 978-3-662-48959-8.

GINOUX, P.; CHIN, M.; TEGAN, I.; PROSPERO, J. M.; HOLBEB, B.; DUBVIK, O.; LIN, S. Sources and distributions of dust aerosols simulated with the GOCART model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 106, n. D17, p. 20255–20273, 2001.

GOMES, H. B.; AMBRIZZI, T.; DA SILVA, B. F. P.; HODGES, K.; DIAS, P. L. S.; HERDIES, D. L.; SILVA, M. C. L. Climatology of easterly wave disturbances over the tropical South Atlantic. *Climate Dynamics*, v. 51, p. 1393–1414, 2019.

GOMES, A. M.; MEDEIROS, R. B.; OLIVEIRA, F. T. Influência das ondas de leste na precipitação do Nordeste brasileiro. In: *Anais do XVIII Congresso Brasileiro de Meteorologia*. João Pessoa, PB, 2019.

GRELL, G. A. AND FREITAS, S. R.: A scale and aerosol aware stochastic convective parameterization for weather and air quality modeling, *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 5233–5250, <https://doi.org/10.5194/acp-14-5233-2014>, 2014.

GUEYMARD, C. A.; YANG, D.; BRIGHT, J. M. Solar radiation modeling and measurements for renewable energy applications: The user's guide to the WRF-Solar model. *Solar Energy*, v. 188, p. 1010–1025, 2019.

GUEYMARD, C. A.; JIMENEZ, P. A. Validation of real-time solar irradiance simulations over Kuwait using WRF-solar. In: *12th International Conference on Solar Energy for Buildings and Industry, EuroSun2018*, Rapperswil, Switzerland, 2018.

HANNA, Steven R.; PAINE, Robert J. Convective scaling applied to diffusion of buoyant plumes from tall stacks. *Atmospheric Environment*, v. 21, n. 10, p. 2153-2162, 1987. DOI: 10.1016/0004-6981(87)90348-9.

HAUPT, SUE ELLEN et al. Building the Sun4Cast system: Improvements in solar power forecasting. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 99, n. 1, p. 121-136, 2018.

HERMAN, G. R.; SCHUMACHER, R. S. Extreme precipitation in models: An evaluation. *Weather Forecast*, v. 31, p. 1853–1879, 2016.

HE, J. J.; YU, Y.; YU, L. J.; LIU, N.; ZHAO, S. P. Impacts of uncertainty in land surface information on simulated surface temperature and precipitation over China. *International Journal of Climatology*, v. 37, p. 829–847, 2017.

HONG, S.-Y.; NOH, Y.; DUDHIA, J. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Monthly Weather Review*, v. 134, p. 2318–2341, 2006.

HUANG, Huilin; QIAN, Yun; HE, Cenlin; BAIR, Edward H.; RITTGER, Karl. Snow Albedo Feedbacks Enhance Snow Impurity-Induced Radiative Forcing in the Sierra Nevada. *Geophysical Research Letters*, v. 49, 2022.

HUBERT, L. F., KRUEGER, A. F. and WINSTON, J. S.: The double intertropical convergence zone - Fact or fiction? *Journal of the Atmospheric Sciences*, 26, 771-773, 1969.

IACONO, Michael J.; DELAMERE, Jennifer S.; MLAWER, Eli J.; SHEPHARD, Mark W.; CLOUGH, Shepard A.; COLLINS, William D. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: calculations with the AER radiative transfer models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, [S.I.], v. 113, n. D13, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1029/2008JD009944>. Publicado em 02 jul. 2008.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Brasil: Divisão territorial do Brasil*. 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 24 set. 2024.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Renewables 2022: Analysis and forecast to 2027*. Paris, 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/renewables-2022>. Acesso em: 22 de nov. 2024.

INPE - INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Dados de irradiação solar no Brasil. 2021. Disponível em: [http://www.inpe.br/climaespacial/tematicas/irradiancia\\_solar.php](http://www.inpe.br/climaespacial/tematicas/irradiancia_solar.php). Acesso em: 22 jan. 2025.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

JANJÍČ, Z. I. The Step-Mountain Eta Coordinate Model: Further Developments of the Convection, Viscous Sublayer, and Turbulence Closure Schemes. *Mon. Weather Rev.*, 122(5), pp. 927–945, 1994.



JEWORREK, J.; WEST, G.; STULL, R. WRF precipitation performance and predictability for systematically varied parameterizations over complex terrain. *Weather Forecast*, v. 36, p. 893–913, 2021.

JEWORREK, J.; WEST, G.; STULL, R. Evaluation of cumulus and microphysics parameterizations in WRF across the convective gray zone. *Weather Forecast*, v. 34, p. 1097–1115, 2019.

JIA, W.; ZHANG, X. The role of the planetary boundary layer parameterization schemes on the meteorological and aerosol pollution simulations: A review. *Atmospheric Research*, v. 239, p. 104890, 2020.

JIMENEZ, PEDRO A. et al. WRF-Solar: Description and clear-sky assessment of an augmented NWP model for solar power prediction. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 97, n. 7, p. 1249–1264, 2016.

JIMENEZ, P.; HACKER, J.; DUDHIA, J.; HAUPT, S. L.; RUIZ-ARIAS, J.; GUEYMAARD, C.; THOMPSON, G.; EIDHAMMER, T.; DENG, A. WRF-Solar: An augmented NWP model for solar power prediction. Model description and clear sky assessment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2015.

JORGENSEN, A. P.; WECKWERTH, T. M. Forcing and organization of convective systems. In: RADAR AND ATMOSPHERIC SCIENCE: A COLLECTION OF ESSAYS IN HONOR OF DAVID ATLAS. Boston, MA, USA: American Meteorological Society, 2003. p. 75–104. ISBN 78-1-878220-36-3.

JUANG, H. M. H., KANAMITSU, M., 1994. The NMC Nested Regional Spectral Model. *Monthly Weather Review*, Boston v.122, n.1, p.3-26.

KESSLER, E. On the distribution and continuity of water substance in atmospheric circulations. *Meteorological Monographs*, v. 10, p. 96, 1969.

KITAGAWA, Y. K. L. Avaliação dos esquemas de camada limite planetária utilizando o modelo WRF para a região Metropolitana de Salvador/BA. 2018. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Espírito Santo, 2018.

KOUSKY, V. E.; GAN, M. A. Upper tropospheric cyclonic vortex in the subtropical South Atlantic. *Tellus*, v. 33, p. 538–551, 1981.

KOUSKY, V. E. Frontal influences on Northeast Brazil. *Monthly Weather Review*, v. 107, n. 9, p. 1140–1153, 1979.

LALA, J.; BAZO, J.; ANAND, V.; BLOCK, P. Optimizing forecast-based actions for extreme rainfall events. *Climate Risk Management*, v. 34, p. 100374, 2021.

LARA-FANEGO, V.; RUIZ-ARIAS, J. A.; POZO-VÁZQUEZ, D.; SANTOS-ALAMILLOS, F. J.; TOVAR-PESCADOR, J. Evaluation of the WRF model solar irradiance forecasts in Andalusia (southern Spain). *Solar Energy*, v. 86, n. 8, p. 2200–2217, 2012. ISSN 0038-092X. DOI: 10.1016/j.solener.2011.02.014.

LAPRISSE, RENÉ et al. Predictability of a nested limited-area model. *Monthly Weather Review*, v. 128, n. 12, p. 4149–4154, 1992.

- LEE, J.; WANG, Y.; LI, Z. Assessing the impact of aerosols on solar radiation in tropical regions using the WRF-Solar model. *Atmospheric Environment*, v. 224, p. 117–134, 2020.
- LEE, J. A., S. E. HAUPT, P. A. JIMÉNEZ, M. A. ROGERS, S. D. MILLER, AND T. C. MCCANDLESS. Solar irradiance nowcasting case studies near Sacramento. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **56**, 85–108, 2017. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-16-0183.1>.
- LIEBMANN, B.; KILADIZ, G. N.; ALLURED, D.; VERA, C.; JONES, C.; CARVALHO, L. M. V.; BLADE, I. B.; GONZALES, P. L. M. Mechanisms associated with large daily rainfall events in northeast Brazil. *Journal of Climate*, v. 24, p. 376–396, 2011.
- LIMA, F. J. L.; SANTOS, T. S.; RAMOS, D. N. da S.; WEYLL, A. L. C.; JACONDINO, W. D.; SILVA, A. R.; PEREIRA, L. K. M.; SANTOS, A. P. P. dos; MELO FILHO, J. B.; CARVALHO FILHO, M. de; SANTOS, A. Á. B.; MOREIRA, D. M. Evaluation of the short and medium-term forecast quality of global solar irradiance from GFS-MOS and WRF-Solar models for the northeast region of Brazil. *Energy Reports*, v. 13, p. 2187-2203, 2025.
- LIU, Y.; QIAN, Y.; FENG, S.; BERG, L. K.; TIMOTHY, W. J.; JIMÉNEZ, P. A.; GRIMIT, E.; YING, L. Calibration of cloud and aerosol related parameters for solar irradiance forecasts in WRF-solar. *Solar Energy*, v. 241, p. 1-12, 2022.
- LÓPEZ-BRAVO, C.; CAETANO, E.; MAGAÑA, V. Forecasting summertime surface temperature and precipitation in the Mexico city metropolitan area: Sensitivity of the wrf model to land cover changes. *Front. Earth Sci.* 2018, 6, 6. <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00006>.
- LORENZ, E.; HURKA, J.; HEINEMANN, D.; BEYER, R. G. Irradiance forecasting for the power prediction of grid-connected photovoltaic systems. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, v. 2, n. 1, p. 2-10, 2009.
- LORENZ, E. N. The Nature and Theory of the General Circulation of the Atmosphere. Ginebra: Organização Meteorológica Mundial, 1963.
- LU, J.; FENG, T.; LI, J.; CAI, Z.; XU, X.; LI, L.; LI, J. Impact of assimilating Himawari-8-derived layered precipitable water with varying cumulus and microphysics parameterization schemes on the simulation of Typhoon Hato. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 124, p. 3050–3071, 2019.
- LYRA, M. J. A.; ARRAUT, J. M. Upper Tropospheric Cyclonic Vortex synoptic and vertical structure study occurred in January 2016. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 38, p. 1–18, 2023.
- LYRA, M. J. A.; FEDOROVA, N.; LEVIT, V. Mesoscale convective complexes over Northeastern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 118, p. 1–7, 2022.
- LYRA, M. J. A.; FEDOROVA, N.; LEVIT, S. W.; FREITAS, I. G. F. Características dos Complexos Convectivos de Mesoescala. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 35, p. 727–734, 2020.
- LYRA, M. J. A.; CAVALCANTE, L. C. V.; LEVIT, V.; FEDOROVA, N. Connection between frontal extremity and intertropical convergence zone on the Northeast Brazil. *Anuário do Instituto de Geociências*, v. 42, p. 413–424, 2019.

- LYRA, G. B.; OLIVEIRA JÚNIOR, J. F.; GOIS, G.; ZERI, G. C.; M. ZERI. Rainfall variability over Alagoas under the influences of SST anomalies. *Meteorol Atmos Phys* 129, 157-171, 2017.
- LYRA, G. B.; OLIVEIRA JÚNIOR, J. F.; ZERI, M. Cluster analysis applied to the spatial and temporal variability of monthly rainfall in Alagoas state, Northeast of Brazil. *International Journal of Climatology*, v. 34, n. 13, p. 3546-3558, 2014.
- MACHADO, I. S.; BORBA, B. S. M. C.; MACIEL, R. S. Modeling distributed PV market and its impacts on distribution system: A Brazilian case study. *IEEE Latin America Transactions*, v. 14, n. 11, p. 4520-4526, 2016.
- MAHBUB ALAM, M. Impact of cloud microphysics and cumulus parameterization on simulation of heavy rainfall event during 7-9 October 2007 over Bangladesh. *Journal of Earth System Science*, v. 123, p. 259-279, 2014.
- MARTINS, F. R.; RÜTHER, R.; PEREIRA, E. B.; ABREU, S. L. Solar energy scenarios in Brazil. Part two: Photovoltaics applications. *Energy Policy*, v. 36, n. 8, p. 2865-2877, 2008.
- MAYER, MARTIN JÁNOS; YANG, DAZHI; SZINTAI, BALÁZS. Comparing global and regional downscaled NWP models for irradiance and photovoltaic power forecasting: ECMWF versus AROME. *Applied Energy*, v. 352, p. 121958, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121958>. Acesso em: 22 out. 2024.
- MELO, R. S. A. de. Análise de fluxo de potência: Estudo para integração de empreendimento de geração centralizada fotovoltaica às instalações de transmissão. Recife, 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências.
- MEDEIROS, F. J.; DE OLIVEIRA, C. P.; SILVA, C. M. S.; MEDEIROS, J. Numerical simulation of the circulation and tropical teleconnection mechanisms of a severe drought event (2012-2016) in Northeastern Brazil. *Climate Dynamics*, v. 54, p. 4043-4057, 2020.
- MERINO, A.; GARCÍA-ORTEGA, E.; NAVARRO, A.; SÁNCHEZ, J. L.; TAPIADOR, F. J. WRF hourly evaluation for extreme precipitation events. *Atmospheric Research*, v. 274, p. 106215, 2022.
- MONIN, A. S.; OBUKHOV, A. M. Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere. *Contrib. Geophys. Inst. Acad. Sci. USSR*, n. 151, p. 163-187, 1954.
- MOURA, A. D.; SHUKLA, J. On the dynamics of droughts in Northeast Brazil: Observations, theory, and numerical experiments with a general circulation model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 38, p. 2653-2675, 1981.
- MOURA, G. B. D. A.; BRITO, J. I. B.; SOUSA, F. A. S.; CAVALCANTI, E. P.; SILVA, J. L. B.; NASCIMENTO, C. R.; LOPES, M. O. Identificação de Preditores Para as Chuvas do Setor Leste do Nordeste do Brasil Utilizando Análise de Correlação Canônica. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 13, n. 4, p. 1463, 2020.
- MOLION; J. C. B.; BERNARDO, S. O. Uma revisão da dinâmica das chuvas no Nordeste brasileiro. *Brasil. Revista Brasileira de Meteorologia*, v.7, n. 1, p. 1-10, 2002

MURATA, A.; OHTAKE, H.; OOZEKI, T. Modeling of uncertainty of solar irradiance forecasts on numerical weather predictions with the estimation of multiple confidence intervals. *Renewable Energy*, v. 117, p. 193-201, 2018.

NOBRE, A. M. Short-term solar irradiance forecasting and photovoltaic systems performance in a tropical climate in Singapore. Tese de doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2015.

NOONI, I. K.; TAN, G.; HONGMING, Y.; SAIDOU CHAIBOU, A. A.; HABTEMICHEAL, B. A.; GNITOU, G. T.; LIM KAM SIAN, K. T. C. Assessing the performance of WRF Model in simulating heavy precipitation events over East Africa using satellite-based precipitation product. *Remote Sensing*, v. 14, p. 1964, 2022.

OLIVEIRA, E. M. G. et al. Parametrizações convectivas no modelo WRF e sua relação com a precipitação durante ciclogêneses no sudeste da América do Sul. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, 2014.

OLIVEIRA, P. T.; SILVA, C. M. S.; LIMA, K. C. Climatology and trend analysis of extreme precipitation in subregions of northeast Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 130, p. 77-90, 2017.

OLIVEIRA, F. P.; OYAMA, M. D. Squall line initiation over the northern coast of Brazil in March: observational features. *Meteorological Applications*, v. 27, p. 1-14, 2019.

ON, N.; KIM, H. M.; KIM, S. Effects of resolution, cumulus parameterization scheme, and probability forecasting on precipitation forecasts in a high-resolution limited-area ensemble prediction system. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, v. 54, p. 623-637, 2018.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. L.; RÜTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. Atlas brasileiro de energia solar. 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 80 p.

PEREIRA, S. C.; CARVALHO, A. C.; FERREIRA, J.; NUNES, J. P.; KAISER, J. J.; ROCHA, A. Weather model performance on extreme rainfall events simulation's over Western Iberian Peninsula. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, v. 9, p. 9163-9191, 2012.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; DE ABREU, S. L.; RÜTHER, R. *Atlas brasileiro de energia solar*. v. 1. São José dos Campos: INPE, 2006.

PEZZI, L. P.; CAVALCANTI, I. F. A. The relative importance of ENSO and tropical Atlantic sea surface temperature anomalies for seasonal precipitation over South America: a numerical study. *Climate Dynamics*, v. 17, p. 205-212, 2001.

PRASAD, A. A.; KAY, M. Assessment of Simulated Solar Irradiance on Days of High Intermittency Using WRF-Solar. *Energies*, v. 13, n. 2, p. 385, 2020.

RAMOS, N. S.; LIMA, J. L.; SÁNCHEZ, G. C. M.; SANTOS, C.; RODRIGUES, A. G.; BUENO, E. P.; VENDRASCO, E. P. Avaliação preliminar do modelo WRF-Solar para previsão de curto prazo das irradiâncias global horizontal e direta normal. *Anais do Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS*, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.59627/cbens.2020.760>. Acesso em: 22 jan. 2025.

RAO, V. B.; FRANCHITO, S. H.; BARBOSA, T. F. Impact of high potential vorticity intrusions into the tropical upper troposphere in South Atlantic on precipitation over Northeast Brazil. *Geophysical Research Letters*, v. 34, L06704, 2007.

REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação da América do Sul: Uma revisão bibliográfica. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 25, p. 185–204, 2010.

REIS, J. A.; ANDRADE, K. S.; FERREIRA, J. T. Vórtices ciclônicos de altos níveis e sua influência na precipitação do Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 36, n. 2, p. 225–238, 2021.

REN21. Renewables 2021 Global Status Report. Paris: REN21 Secretariat, 2021. Disponível em: <https://www.ren21.net/reports/global-status-report/>. Acesso em: 7 nov. 2024.

REPINALDO, H. F. B.; FEDOROVA, N.; LEVIT, S. W.; REPINALDO, C. R. R. Upper Tropospheric Cyclonic Vortex and Brazilian Northeast Jet Stream over Alagoas State: Circulation patterns and rainfall. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 35, p. 745–754, 2020.

RIIHIMAKI, LAURA D.; ZHANGSHUAN, XINYA LI; BERG, LARRY K. Improving prediction of surface solar irradiance variability by integrating observed cloud characteristics and machine learning. *Solar Energy*, v. 225, p. 275–285, 2021.

RODRIGUES-BENÍTEZ, F. et al. A short-term solar radiation forecasting system for the Iberian Peninsula. Part 1: Models description and performance assessment. *Solar Energy*, v. 195, p. 396–412, 2020.

ROZANTE, J. R.; MOREIRA, D. S.; DE GONÇALVES, L. G. G.; VILA, D. A. Combining TRMM and surface observations of precipitation: Technique and validation over South America. *Weather Forecast*, v. 25, p. 885–894, 2010.

RUIZ-ARIAS, JOSÉ A.; DUDHIA, JIMY; GUEYMARD, CHRISTIAN A. A simple parameterization of the short-wave aerosol optical properties for surface direct and diffuse irradiances assessment in a numerical weather model. *Geoscientific Model Development*, 7, 3, 1159–1174, 2014.

SANTOS, J. A.; SILVA, R. C.; OLIVEIRA, P. L. Irradiância solar e seu potencial para geração de energia fotovoltaica. *Revista Brasileira de Energia Renovável*, v. 9, n. 3, p. 45–60, 2020.

SEHNEM, JOSUE MIGUEL. Estimativa da produção de energia solar fotovoltaica com base em modelos meteorológicos. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, 2018.

SECTI. Atlas solar: Bahia, 2018.

SCHUCK, C. CAMILA. Análise do impacto da geração distribuída fotovoltaica em sistemas de distribuição utilizando múltiplos cenários de geração com discretização intra-horária. Rio de Janeiro: UFRJ/ESCOLA POLITÉCNICA, 2020.

SILVA, T. R. B. F.; DOS SANTOS, C. A. C.; SILVA, D. J. F.; SANTOS, C. A. G.; SILVA, R. M. D.; BRITO, J. I. B. D. Climate indices-based analysis of rainfall spatiotemporal variability in Pernambuco State, Brazil. *Water*, v. 14, p. 2190, 2022.

SKAMAROCK, W., KLEMP, J., DUDHIA, J., GILL, D. O., BARKER, D., DUDA, M. G., HUANG, X.-Y., WANG, W., & POWERS, J. G. *A Description of the Advanced Research WRF Version 3*. University Corporation for Atmospheric Research, 2008. <https://doi.org/10.5065/D68S4MVH>

SOUZA, E.D.O.; COSTA, M.D.S.; OLIVEIRA JÚNIOR, J.F.D.; GOIS, G.; MARIANO, G.L.; COSTA, C.E.D.S.; SANTIAGO, D.D.B. Estimativa e Espacialização da Erosividade em Mesorregiões Climáticas no Estado de Alagoas. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 35, 769–783, 2020.

STENSRUD, D. J. Parameterization schemes: keys to understanding numerical weather prediction models. Cambridge University Press, 478 p., 2007.

STENSRUD, D. J.; MING, X.; WICKER, L. J.; KELLEHER, K. E.; FOSTER, M. P.; SCHAEFER, J. T.; SCHNEIDER, R. S.; BENJAMIN, S. G.; WEYGANDT, S. S.; FERREE, J. T.; et al. Convective-scale warn-on-forecast system: A vision for 2020. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 90, p. 1487–1499, 2009.

TAPIADOR, F. J.; TAO, W. K.; SHI, J. J.; ANGELIS, C. F.; MARTINEZ, M. A.; MARCOS, C.; RODRIGUEZ, A.; HOU, A. A comparison of perturbed initial conditions and multiphysics ensembles in a severe weather episode in Spain. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, v. 51, p. 489–504, 2012.

TEWARI, M., CHEN, F., WANG, W., DUDHIA, J., LEMONE, M. A., MITCHELL, K., EK, M., GAYNO, G., WEGIEL, J., AND CUENCA, R. H. Implementation and Verification of the Unified Noah Land Surface Model in the WRF Model. *Bulletin of the American Meteorological Society*, pp. 2165–2170, 2004.

THOMPSON, G.; EIDHAMMER, T. A study of aerosol impacts on clouds and precipitation development in a large winter cyclone. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 71, n. 10, p. 3636-3658, 2014.

THOMPSON, G., M. TEWARI, K. IKEDA, S. TESSENDORF, C. WEEKS, J. OTKIN, AND F. KONG. Explicitly-coupled cloud physics and radiation parameterizations and subsequent evaluation in WRF high-resolution convective forecasts. *Atmos. Res.*, **168**, 92–104, 2015. doi:10.1016/j.atmosres.2015.09.005.

TUCHTENHAGEN, PATRICIA NUNES. WRF e o potencial eólico no Brasil em 2011. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pelotas, 2013.

UTIDA, G.; CRUZ, F. W.; ETOURNEAU, J.; BOULOU BASSI, I.; SCHEFUß, E.; VUILLE, M.; NOVELLO, V.; PRAD, L. F.; SIFEDDINE, A.; KLEIN, V.; ZULAR, A.; VIANA, J. C. C.; TURCQ, B. Tropical South Atlantic influence on northeastern Brazil precipitation and ITCZ displacement during the past 2300 years. *Sci Rep*, v. 9, p. 1698, 2019.

UVO, C. R. B. e NOBRE, C. A. A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e a precipitação no norte do Nordeste do Brasil. Parte I: A Posição da ZCIT no Atlântico Equatorial. *Climanálise*, v. 4, n. 07, p.34-40, 1989.

WAGNER, A.; HEINZELLER, D.; WAGNER, S.; RUMMLER, T.; KUNSTMANN, H. Explicit convection and scale-aware cumulus parameterizations: High-resolution simulations over areas of different topography in Germany. *Monthly Weather Review*, v. 146, p. 1925–1944, 2018.

WORLD BANK GROUP. Global solar atlas. Disponível em: <https://globalsolaratlas.info/map>. Acesso em: 21 jun. 2023.

WONG, M.; ROMINE, G.; SNYDER, C. Model improvement via systematic investigation of physics tendencies. *Monthly Weather Review*, v. 148, p. 671–688, 2020.

WMO/OSCAR, Satellite: GOES-R. Disponível em: <https://www.wmo-sat.info/oscar/satellites/view/152>. Acesso em: 13 jan. 2025.

XAVIER, T. M. B. S., XAVIER, A. F. S., SILVA DIAS, P. L., SILVA DIAS, M. A. F. A Zona de Convergência Intertropical - ZCIT e suas relações com a chuva no Ceará (1964-98). *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 15, n. 1, p. 27-43, 2000.

XIE, Y.; SENGUPTA, M.; DUDHIA, J. A Fast All-sky Radiation Model for Solar Applications (FARMS): Algorithm and performance evaluation. *Solar Energy*, v. 135, p. 435-445, 2016.

YAGLI, G. M.; YANG, D.; SRINIVASAN, D. Reconciling solar forecasts: Sequential reconciliation. *Solar Energy*, v. 179, p. 391-397, 2019.

YANG, JAEMO; SENGUPTA, M.; XIE, Y.; JIMENEZ, P. A.; KIM, J. H. Adjoint Sensitivity of FARMS to the Forecasting Variables of WRF-Solar. Golden, CO: National Renewable Energy Lab. (NREL), 2019.