

# DESEMPENHO DA ALTA RESOLUÇÃO DO WRF-SOLAR NA ESTIMATIVA DA IRRADIÂNCIA GLOBAL HORIZONTAL NA CIDADE DE MACAPÁ-AP.

Ana Cleide Bezerra Amorim – anaamorim@isi-er.com.br

Vanessa de Almeida Dantas

Jean Souza dos Reis

Instituto de Inovação SENAI - Energias Renováveis

Nicolas de Assis Bose

Instituto de Inovação SENAI - Energias Renováveis

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências

Samira de Azevedo Santos Emiliavaca

Alan Rodrigues de Sousa

Instituto de Inovação SENAI - Energias Renováveis

**Resumo.** A diversificação da matriz energética traz diferentes benefícios, e a energia solar fotovoltaica é uma fonte promissora de energia devido a sua escalabilidade e modularidade. O estado do Amapá localiza-se na região tropical, onde recebe uma grande quantidade de energia solar durante todo o ano. No entanto, a falta de estudos do potencial solar da região, dificulta a expansão dos sistemas fotovoltaicos no estado. Na avaliação dos recursos solares, os modelos atmosféricos surgiram como uma ferramenta fundamental como, por exemplo, o Weather Research Forecast (WRF). A versão 4.3.1 do modelo WRF-Solar, versão específica para atender às aplicações de energia solar, foi utilizada para simular a Irradiância Global Horizontal (GHI) da cidade de Macapá-AP, na região Norte do Brasil. O objetivo foi mostrar resultados preliminares sobre a eficiência do modelo WRF-Solar na estimativa da GHI sazonal da cidade de Macapá-AP, além de verificar se, uma alta resolução melhora os resultados das simulações. O Ano Meteorológico Típico (Typical Meteorological Year, TMY) foi calculado a partir do método Sandia. O algoritmo proposto pela Baseline Surface Radiation Network (BSRN) foi utilizado para tratar os dados horários da estação meteorológica automática (EMA) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) da cidade de Macapá-AP. Duas parametrizações de cumulus foram indispensáveis para representar a região. Dados de entrada de reanálises do ERA5 de 1 em 1 hora, foram utilizados. O uso de dados com alta resolução reduziu o nRMSE da GHI, principalmente durante a primavera, de 22% para 17%. A redução no RMSE foi aproximadamente  $48,37 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  na primavera. Estimativas mais eficientes nas simulações com o WRF-Solar de alta resolução foram encontradas.

**Palavras-chave:** Modelagem Atmosférica, Energia Solar, Região Norte

## 1. INTRODUÇÃO

No ano da pandemia o estado do Amapá sofreu um episódio de interrupção de energia elétrica durante 22 dias, especificamente em novembro de 2020, deixando mais de 90% da população com a falta de fornecimento de energia elétrica. Novamente, em janeiro de 2021, outro episódio de interrupção de 4 horas nos 13 dos 16 municípios do estado. Eventos como estes trazem a discussão da necessidade de diversificação da matriz energética por meio das fontes renováveis, de forma a garantir a segurança energética do estado.

A energia solar fotovoltaica é uma fonte promissora de energia devido a sua escalabilidade e modularidade, podendo ser aplicada desde sistemas residenciais até grandes empreendimentos de centenas de MWp de potência instalada. O Atlas Solar brasileiro (Pereira *et al.*, 2017) mostra a região norte do Brasil com valores médios mensais de irradiação global horizontal superiores ao encontrados em países da Europa. Atrelado ao excelente recurso, a queda no preço dos sistemas fotovoltaicos e a resolução normativa N° 482 da ANEEL e suas modificações, fez da energia solar fotovoltaica uma das principais fontes de energia do país. Nos últimos 5 anos a energia solar tem se destacado na Matriz elétrica brasileira e hoje já representa 5,39% da matriz energética do país (ANEEL, 2023). A diversificação da matriz energética traz diferentes benefícios, além da segurança energética, entre ambientais, econômicos, sociais e de saúde, inclusive para áreas rurais e/ou isoladas, como existem várias no estado do Amapá. Contudo, o estado do Amapá não possui um grande destaque nacional em geração solar fotovoltaica, configurando-se como o estado com a menor potência instalada de energia solar no país, com apenas 35,8 MW (ABSOLAR, 2023).

O estado do Amapá localiza-se na região tropical, onde recebe uma grande quantidade de energia solar durante todo o ano. A localização privilegiada do estado em relação ao quantitativo de radiação solar que chega à superfície é um ponto importante, em contrapartida a região apresenta uma grande quantidade de nebulosidade ocasionada pela presença da Zona de convergência Intertropical, tornando-se um grande desafio para o uso da energia solar. Juntamente a esse fato, a falta de estudos do potencial solar da região, dificulta a expansão dos sistemas fotovoltaicos no estado.

Na avaliação do recurso solar, os modelos atmosféricos surgiram como uma ferramenta fundamental como, por exemplo, o *Weather Research Forecast* (WRF) (Fountoukis *et al.*, 2018). O WRF é o estado da arte em modelação numérica da atmosfera, organizado por universidades e instituições de investigação nos Estados Unidos, de código aberto e estável, podendo ser executado em supercomputadores e mesmo em máquinas domésticas, sendo utilizado para fins operacionais e de investigação em vários países (Powers *et al.*, 2017). Uma versão específica do WRF foi desenvolvida para atender às demandas relacionadas à energia solar, conhecida como WRF-solar. Este último apresenta refinamentos físicos direcionados ao setor de energia solar (Xie *et al.*, 2016). Entre esses refinamentos, o modelo oferece produtos de irradiância de superfície, sendo a irradiância horizontal global (GHI) um deles. Através da GHI, é possível determinar o potencial do recurso solar no local de estudo.

Recentemente, o potencial do recurso solar fora simulado para os estados da Bahia, Ceará e Rio Grande do Norte (Monfort *et al.*, 2018; Back *et al.*, 2019; Nobre *et al.*, 2022) com o modelo WRF. O objetivo é mostrar resultados preliminares sobre a eficiência do modelo WRF-Solar na estimativa da GHI sazonal da cidade de Macapá-AP, além de verificar se, uma resolução mais refinada melhora os resultados das simulações.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

**Área de estudo.** O estado do Amapá possui uma área de 142.470,762 km<sup>2</sup> e apresenta a maior cobertura de vegetação nativa do território brasileiro, além da faixa leste e norte é completamente coberta por mangues (Diniz *et al.* 2019). A área do estado faz fronteira com Guiana Francesa, Suriname, estado do Pará e Oceano Atlântico, Fig. 1. Altitudes com mais de 700 m (Fig. 1) em relação ao nível médio do mar são encontradas nas porções oeste e sudoeste, as quais destacam-se as Serra do Tumucumaque, na fronteira com a Guiana Francesa, de grandes jazidas minerais, e, a Serra do Iratapuru, à sudoeste do estado, com amplas reservas de castanhas da Amazônia. A cidade de Macapá possui área de 6.563,849 km<sup>2</sup>, onde abriga maior parte da população e é única capital do Brasil cortada pela linha do Equador.

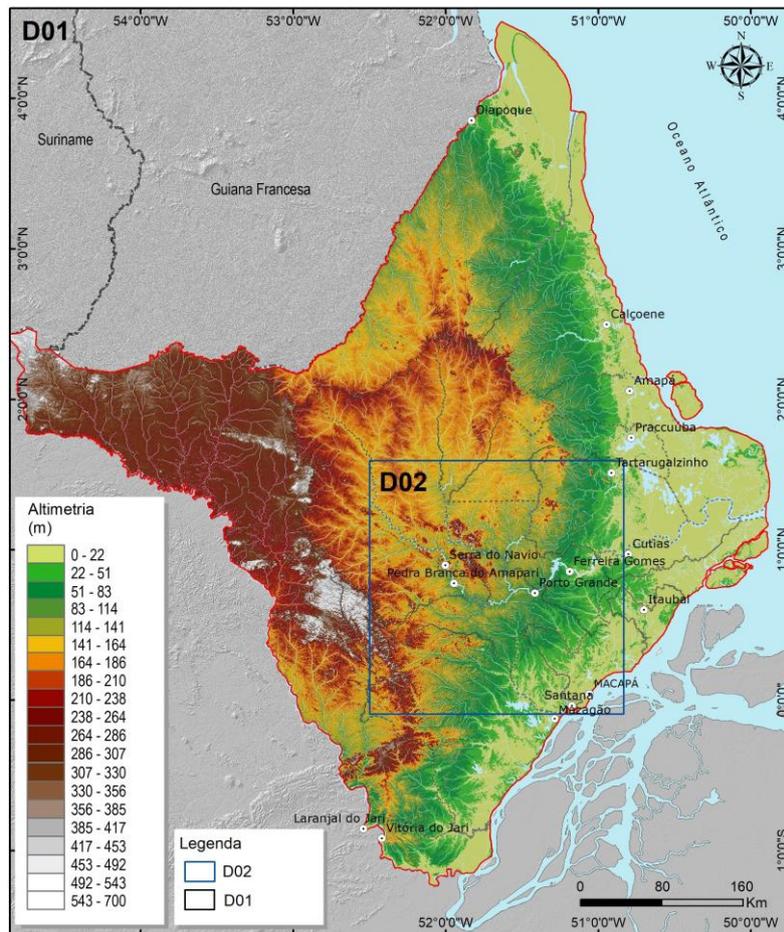


Figura 1 - Mapa topográfico do estado do Amapá. As siglas D01 e D02 referem-se ao domínio do WRF-Solar.

O clima do estado do Amapá é considerado tropical (Am), de acordo com Alvarez *et al.* (2013). No entanto, existem literaturas que sugere para localidade de Macapá o clima tropical com savana e chuva de verão (Peel *et al.*, 2007; Vilhena *et al.*, 2017) representado pela simbologia Aw. A precipitação anual na capital Macapá apresenta valor médio de 2850 mm com período de monções entre fevereiro e maio, devido a presença da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). A cidade é conhecida como uma das capitais brasileiras mais chuvosas e quente com média

anual de temperatura de 27,6° C (Alvarez *et al.*, 2013). A ZCIT é um dos mais importantes sistemas meteorológicos atuante no estado do Amapá. O posicionamento climatológico da ZCIT sobre o norte da Amazônia brasileira na estação de verão (dezembro, janeiro e fevereiro) e outono (março, abril e maio) é a principal causa da diminuição da radiação solar que chega à superfície (Varejão-Silva, 2006).

**Dados.** Utilizaram-se dados do ano de 2014 da estação meteorológica automática (EMA) da cidade de Macapá, no estado do Amapá pertencente ao INMET. A EMA é formada por um *datalogger* (unidade central de memória) conectada aos vários sensores de parâmetros meteorológicos. As informações de GHI são disponíveis a partir de um piranômetro de fotodiodo com frequência de 1 hora e apresentam dados a partir de dezembro de 2013. O ano de 2014 foi utilizado por não apresentar falhas na série temporal de GHI de Macapá. Pereira *et al* (2017) ressaltam as incertezas que as EMAs apresentam para fins de solarimetria, no entanto, os seus dados foram utilizados na validação do Atlas Brasileiro de Energia Solar (2017), mediante aplicação de elevados critérios de qualidade e ainda justifica o uso da base de dados do INMET, por conta de não existir no Brasil outra rede de estações automáticas com a mesma densidade que apresenta o instituto.

Os dados de GHI do INMET foram tratados de acordo com o algoritmo proposto pela *Baseline Surface Radiation Network* (BSRN) (Long e Shi, 2008). Na metodologia do controle de dados utilizada é aplicado um conjunto de testes definidos como: testes globais, testes físicos, testes de refinamento e testes comparativos. Em relação aos testes de refinamento, compreende a comparação com o modelo de céu claro, a consistência temporal e a persistência.

Foram utilizados os Dados do *National Solar Radiation Database* (NSRDB) - *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) (Sengupta *et al.*, 2018) que apresenta um viés de 5% na variável GHI em relação aos dados observados de superfície, uma resolução horizontal de 4 km e intervalo de 60 minutos de 1998 a 2020.

E por fim, os dados de GHI do *Copernicus Atmosphere Monitoring Service* (CAM5) também foram introduzidos nas análises.

As estações sazonais seguiram as tradicionais siglas: DJF (dezembro, janeiro e fevereiro) para o verão; MAM (março, abril e maio), o outono; JJA (junho, julho e agosto) ao inverno e SON (setembro, outubro e novembro), período da primavera.

**Seleção do TMY.** Entre os diferentes métodos para o cálculo do TMY, o *Sandia National Laboratories* é um dos métodos mais aceitos (Skeiker, 2006; Hall *et al.*, 1978). O TMY foi estimado com dados do NSRDB/NREL (Sengupta *et al.*, 2018). O TMY é um tipo de dados amplamente utilizado disponível através do NSRDB. O TMY contém um ano de dados horários que melhor representam as condições médias meteorológicas durante um período de vários anos. O TMY são meses individuais que representa a disponibilidade do recurso de energia solar visando o desenvolvimento de projetos para aproveitamento do recurso energético. Mais detalhes a respeito do método Sandia encontra-se em Wilcox *et al.* (2008).

**Modelagem Atmosférica em mesoescala: WRF-Solar.** A GHI do Amapá foi simulada pela versão 4.3.1 modelo WRF (*Weather Research and Forecasting*). O modelo - WRF é de domínio público e disponibilizado gratuitamente (Skamarock *et al.*, 2021). As simulações foram realizadas usando uma configuração específica solar (Jimenez *et al.*, 2016), entre as principais melhorias e novidades desenvolvidas no WRF-Solar estão a disponibilidade das componentes de irradiação solar global horizontal (GHI), direta normal (DNI) e difusa horizontal (DHI), usadas na indústria deste setor. As simulações foram realizadas em parceria com o Núcleo de Processamento de Alto Desempenho- NPAD, sediado na Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Testes de sensibilidade foram realizados com diferentes esquemas de parametrizações para seleção apropriada para que melhor representassem a variável GHI da cidade de Macapá-AP. Os testes foram executados para o período chuvoso e menos chuvoso da região, e após as análises a opção o uso do conjunto de parametrizações ilustradas na Tab. 1.

Para a avaliação da GHI foram criados dois domínios, 9 e 3 km de resolução horizontal (ver Fig. 1 ilustradas como áreas D01 e D02). O objetivo de uma resolução horizontal mais refinada concorda com outros autores, Lara-Fanego *et al.* (2012a), Gueymard e Jimenez (2018) e Thaker e Holler (2023) que avaliaram a melhoria nos resultados das simulações para estimar a GHI na região da Andaluzia na Espanha, sobre o Kuwait na e Wels na Áustria, utilizando o WRF-Solar. A grade mãe compreendido entre 6°N - 2°S e 55°W - 48,5°W, com 101x101 pontos de grade, foi centrado sobre a porção leste do estado do Amapá (2°S;51,20°W) e foi configurado para um espaçamento de grade de 9 x 9 km. O segundo domínio (3 km), estendendo-se entre e 0,097°S - 1,587°N e 50,83°W - 52,49°W com 106 x 106 pontos de grade, centrado próximo a cidade de Porto Grande (e incluindo as cidades como Macapá e Santana).

Tabela 1: Parametrizações físicas usadas nos experimentos do WRF-Solar para o período chuvoso e menos chuvoso.

Parametrizações	Período menos chuvoso (junho a novembro)	Período chuvoso (dezembro a maio)
Microfísica	WSM6 (Hong e Lim, 2006)	WSM6 (Hong e Lim, 2006)
Radiação de onda longa	RRTM (Mlawer <i>et al.</i> , 1997)	RRTM (Mlawer <i>et al.</i> , 1997)
Radiação de onda curta	Dudhia (Dudhia, 1989)	Dudhia (Dudhia, 1989)
Camada superficial	MYNN - Nakanishi e Niino (2009)	MYNN - Nakanishi e Niino (2009)
Processos de superfície	NOAH LSM (Tewari <i>et al.</i> , 2004)	NOAH LSM (Tewari <i>et al.</i> , 2004)
Camada limite planetária	MYNN2,5 (Nakanishi e Niino, 2006)	MYNN2,5 (Nakanishi e Niino, 2006)
Cumulus	Grell-Devenyi (GD) Ensemble (Grell e Devenyi, 2002)	Kain-Fritsch (Kain, 2004):

Os dados de entrada para as simulações foram de reanálises do ERA5 do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF). A resolução espacial do ERA5 é aproximadamente 25 km, resolução temporal de 1 em 1 hora e a vertical utilizada foi de 38 níveis, com pressão no topo da atmosfera de 10 hPa. As simulações apresentam saídas a cada 1 hora, sendo retiradas as primeiras 24 horas de spin-up, que representa o tempo para ajuste das simulações.

**Métricas de desempenho.** Os erros sistemáticos e a habilidade do WRF-Solar foram avaliados a partir da correlação de person ( $r$ ), a raiz do erro quadrático médio (RMSE), rmse normalizado (nRMSE), o erro médio absoluto (EMA) e nEMA normalizado (nEMA) (Wilks, 2006; Otto *et al.*, 2018).

O coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) é uma das métricas mais utilizadas para estimar a qualidade entre dois bancos de dados. Essa correlação é uma medida de associação linear entre variáveis definida pela Eq. (1). A raiz do erro quadrático médio (RMSE) apresenta valores do erro na mesma unidade de medida da variável analisada e pode ser descrita na Eq. (2) e o RMSE normalizado na Eq. (3). O EMA é observado da Eq. (4) e o nEMA pela Eq. (5). As simulações são representadas pela  $S$  e os dados observados  $O$ .

$$r = \sum \frac{(s_i - \bar{s}_i)(o_i - \bar{o}_i)}{\sqrt{(s_i - \bar{s}_i)^2 + (o_i - \bar{o}_i)^2}} \quad (1)$$

$$RMSE = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$rRMSE = \frac{RMSE}{\frac{1}{n} \sum_i^n o_i} \times 100 \quad (3)$$

$$EMA = \frac{1}{N} \sum_{(i=1)}^N |S_i - O_i| \quad (4)$$

$$rEMA = \frac{EMA}{\frac{1}{n} \sum_i^n o_i} \times 100 \quad (5)$$

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os meses individuais que representam um ano meteorológico típico (ou TMY) para Macapá-AP é observado na Tab. 2. O TMY foi calculado para latitude de 0,035 e longitude de -51,089, coordenadas da EMA de Macapá-AP.

Tabela 2 – TMY para a cidade de Macapá-AP

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
anos	2004	2013	2007	2014	2015	2015	2008	2006	2009	2001	2013	2006

A validação da simulação do TMY foi realizada na escala semanal e mensal a partir do coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ), comparando a GHI do domínio mãe de cada mês e ano específico com dados do ERA5 e CAMS. A Tab. 3 ilustra os resultados das correlações apenas mensais.

A validação da simulação do TMY foi conduzida comparando a GHI do ERA5/CAMS e a simulada pelo WRF-Solar. Vale ressaltar que, dentre os meses específicos do TMY, havia um mês de dados disponíveis na EMA de Macapá-AP. Nos demais meses, as correlações foram realizadas com base em dados provenientes do ERA5 e do CAMS. A validação efetuada utilizando dados observados da EMA refere-se ao mês de abril de 2014 e resultado da correlação foi 0,71.

Ao estender a validação para os demais meses, utilizando fontes secundárias, o WRF-Solar apresentou um desempenho satisfatório, especialmente no segundo semestre, com correlações superiores a 0,9. No entanto, durante o período chuvoso, as correlações ainda se mantiveram acima de 0,7. Esses resultados evidenciam a eficácia do modelo WRF-Solar na simulação do TMY, ilustrado na Tab. 3.

No geral, as correlações mensais mostraram valores entre 0,71 e 0,98 enquanto as análises semanais (Tab. não exibida) ocorreram entre 0,8 e 0,89.

Tabela 3 – Correlações mensais dos dados horários de GHI ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) entre o WRF-Solar (domínio D01) e dados disponíveis do TMY (INMET, ERA5 e CAMS).

Dados	TMY	mensal
Macapá-AP (ERA5)	01/2004	0,89
Macapá-AP (CAMS)	02/2013	0,84
Macapá-AP (CAMS)	03/2007	0,77
Macapá-AP (INMET e CAMS)	04/2014	0,71 e 0,82
Macapá-AP (CAMS)	05/2015	0,88
Macapá-AP (CAMS)	06/2015	0,93
Macapá-AP (CAMS)	07/2008	0,94
Macapá-AP (CAMS)	08/2006	0,95
Macapá-AP (CAMS)	09/2009	0,96
Macapá-AP (CAMS)	10/2001	0,98
Macapá-AP (CAMS)	11/2013	0,94
Macapá-AP (CAMS)	12/2006	0,92

**Desempenho do WRF-Solar.** Na Tab. 4 é exibido a habilidade da simulação do WRF-Solar para o ano de 2014, na escala sazonal entre duas resoluções de grade, 9 e 3 km. Os resultados foram realizados a partir da série temporal dos dados horários para o ano de 2014 da cidade de Macapá-AP.

Os resultados mostraram que os RMSE's variaram de 223,87 a 288,42  $\text{W}/\text{m}^2$  para 9 Km e 175,50 a 262,89  $\text{W}/\text{m}^2$  a partir de 3 Km. Os nRMSE apresentaram-se entre 22 e 29% (9 Km) e 27 e 17% (3 Km). A literatura discute a respeito dos erros do modelo WRF, que mostram nRMSE entre de 20 e 25% (Fountoukis *et al.*, 2018), desta forma esse comportamento é comum em diversas partes do mundo (Ruiz-Arias *et al.*, 2013; Zempila *et al.*, 2016; Fountoukis *et al.*, 2018; Kim *et al.*, 2022) e os resultados para a cidade de Macapá mostraram-se satisfatórios com a literatura, especialmente para 3km.

Os resultados mostraram maiores erros nas estações com maior concentração de nebulosidade, é uma limitação do modelo, que a literatura discute e tem tentado melhorar cada vez mais (Yang *et al.*, 2019; Kim *et al.*, 2020;). Lara-Fanego *et al.* (2012) observaram o desempenho do WRF para o sul de Espanha, utilizando diferentes estações do ano e três tipos de céu diferentes (limpo, nublado e encoberto) e encontraram uma dependência notável entre a capacidade do modelo para reproduzir o GHI e a cobertura de nuvens. Yang *et al.* (2019) examinaram a sensibilidade de diversas variáveis de entrada para prever o GHI a partir do WRF-Solar e os resultados apontaram a profundidade óptica das nuvens como uma das variáveis altamente sensíveis para prever o GHI.

Os resultados mais eficientes encontram-se na estação SON, período de maior aproveitamento do recurso solar da cidade, é um período que apresenta menor quantidade de nebulosidade e o WRF-Solar simula satisfatoriamente sob condições sem nuvens (Gueymard e Jimenez 2018). Aqui essa particularidade do WRF-Solar também foi encontrada, o RMSE foi o menor, de 223,87  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$  na resolução de 9 Km, e esse valor ainda reduziu para 175,71  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$  com a grade de 3km. A utilização de uma resolução mais refinada reduziu o nRMSE da GHI durante todas as estações do ano, principalmente na primavera austral de 22% para 17%, essa redução foi aproximadamente de 48  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ . Na Grécia, Zempila *et al.* (2016) evidenciaram entre quatro diferentes esquemas de radiação de onda curta, o melhor desempenho foi em condições de céu limpo. Incekik *et al.* (2019) analisaram a capacidade de previsão do modelo WRF com quatro configurações diferentes de parametrizações físicas para 72 h, e os resultados foram melhores em condições de céu limpo.

O melhor desempenho do modelo para estação de primavera também é validado a partir do EMA e nEMA. O EMA de SON foi 154,23 e a resolução a 3km reduziu o erro para 121,08 e nEMA de 15% reduziu para 12%. As correlações acima de 0,8 são observadas apenas na primavera nas duas resoluções. As correlações acima de 0,6 são encontradas para 3km e ultrapassando 0,8 em ambas as resoluções na primavera. Recentemente, a literatura tem trazido resultados com

erros menores a partir de uma resolução mais refinada. Thaker e Höller (2023) analisaram o desempenho do WRF-Solar para dois domínios (1 e 3 km) em relação a dados do Sistema de Previsão Global (GFS) e os resultados do WRF-Solar apresentaram erros menores, especialmente os resultados da alta resolução.

Tabela 4 – Métricas entre as simulações do WRF-Solar entre 9 e 3 km e os dados observados de Macapá-AP. Os RMSE são dados em  $W/m^2$ , nRMSE e nEMA em percentual (%) e as demais são admissionais.

Estação sazonal	GHI na resolução 9 km (3 km)				
	RMSE ( $W/m^2$ )	nRMSE (%)	r	EMA	nEMA (%)
DJF	288,40 (262,92)	26 (24)	0,56 (0,66)	201,56 (179,50)	18 (16)
MAM	258,94 (250,15)	24 (23)	0,56 (0,64)	180,40 (170,98)	17 (16)
JJA	288,42 (262,89)	29 (27)	0,64 (0,69)	204,99 (177,61)	21 (18)
SON	223,87 (175,50)	22 (17)	0,82 (0,88)	154,23 (121,08)	15 (12)

**Ciclo médio diário de GHI.** O ciclo médio diário de GHI para cada estação sazonal é ilustrado na Fig. 2, em que são comparados os ciclos médios diários dos dados observados (linha preta) versus WRF-9km (linha vermelha) e WRF-3km (linha azul). Em todas as estações do ano, o ciclo médio diário de GHI mostra resultado mais próximo a partir da da resolução de 3km, especificamente no intervalo de elevados valores de radiação, entre 9 e 15h local, com exceção na estação de inverno (JJA) que WRF-solar subestima a variável GHI, mas ainda com resultados de 3km mais próximo do observado.

Os horários de máximo GHI a partir dos dados observado ocorreram às 13h local durante todas as estações do ano, e as simulações do WRF-Solar atrasaram e/ou anteciparam em 1 hora a ocorrência desses máximos. A localização sobre região do equador proporciona aos máximos GHI ocorrerem sempre no mesmo horário (Varejão-Silva, 2006).

No verão (DJF), os valores máximos atrasaram em 1h, ocorrendo às 14h com valores de 476 e 693  $W/m^2$  (9 e 3 Km), no entanto o máximo observado foi 714  $W/m^2$  e às 13h. Em outono foi similar, com valor máximo de GHI observado de 610  $W/m^2$  às 13h, e as simulações com um atraso de 1h e valores 428 e 640  $W/m^2$  para 9 e 3 km. No inverno, as simulações acertaram o horário de máxima GHI, em ambas as resoluções o pico ocorreu às 13h com valores de 538 e 634  $W/m^2$  e o valor observado na estação de Macapá foi 846  $W/m^2$ . Entre os resultados das simulações da alta resolução, a estação de inverno foi a que mais subestimou o ciclo médio diário (Figura 2C). Na estação de primavera, os dados observados mostram um valor máximo de GHI 962  $W/m^2$ , a simulação do WRF-Solar de 9km ocorreu às 13h, no entanto com um valor de 745  $W/m^2$  e a alta resolução antecipa o pico de GHI com o valor 883  $W/m^2$  (Figura 2D).

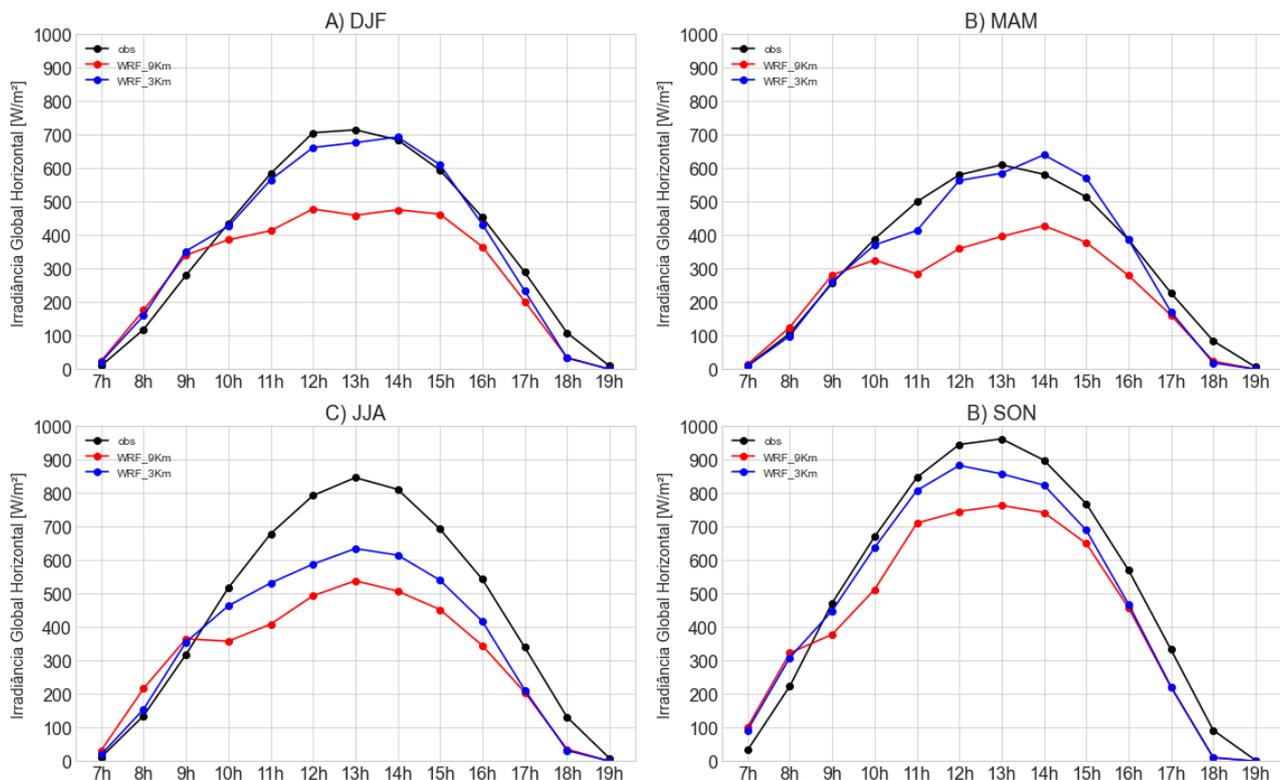


Figura 2 – Ciclo diário médio sazonal da Irradiância Global Horizontal ( $W/m^2$ ) observada para o ano de 2014 para cidade de Macapá-AP e as simuladas pelo modelo WRF com 9 e 3 km: A) DJF, B) MAM, C) JJA e D) SON.

#### 4. CONCLUSÕES

Apresentou-se resultados preliminares da eficiência do modelo WRF-Solar na estimativa da irradiância global horizontal sazonal da cidade de Macapá-AP, além de mostrar a melhoria que uma resolução mais refinada pode trazer aos resultados. O WRF-Solar mostrou-se eficiente na estimativa da GHI para a localidade de Macapá-AP, podendo ser utilizado para diversos estudos e cálculo do potencial do recurso solar, além do monitoramento referente à indústria de energia solar. O resultado aqui apresentado auxilia o crescimento do âmbito de energia na região, trazendo mais investimentos, desta forma refletindo no desenvolvimento econômico do estado para o setor da indústria solar. O uso do potencial solar é uma realidade para diversas regiões do Brasil, e avanços no conhecimento científico e utilização de ferramentas da modelagem atmosférica motiva a continuidade das pesquisas na área das energias renováveis no estado do Amapá.

As pesquisas referentes ao potencial energético no estado do Amapá estão em andamento, sendo parte de um projeto ainda em execução e em breve resultados serão publicados em revistas da área energias renováveis.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação do Brasil (MCTIC) pela bolsa de pesquisa no âmbito do projeto “Mapeamento do Recurso Eólico da Margem Equatorial Brasileira”, número de concessão 920008/2021, concedida a primeira autora. O agradecimento ainda se estende ao Instituto SENAI de Inovação em Energias Renováveis – Rio Grande do Norte pelo suporte administrativo.

#### REFERÊNCIAS

- ABSOLAR - Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica, 2023. Energia Solar Fotovoltaica no Brasil, Infográfico ABSOLAR n° 60. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acesso em novembro de 2023.
- Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Gonçalves, J. L. de M., & Sparovek, G., 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711-728. doi:10.1127/0941-2948/2013/0507
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, 2023. Capacidade de Geração no Brasil. BIG - Banco de Informações de Geração. Disponível em <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>. Acesso em maio 2023.
- Back, A. C. *et al.*, 2019. Atlas Eólico e Solar: Ceará. Curitiba: Camargo Schubert; Fortaleza, ADECE/FIEC/SEBRAE, 188p.
- Diniz, C., Cortinhas, L., Nerino, G., Rodrigues, J., Adami, M., Souza-Filho, P. W. M., 2019. Situação dos Manguezais Brasileiros: Três Décadas de Satélite. *Sensoriamento Remoto*, v. 808, n. 11. doi:10.3390/rs11070808.
- Dudhia, J., 1989. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 46, p. 3077–3107.
- Ferreira, N. S., 1996. Zona de Convergência Intertropical. *Climanálise-Boletim de Monitoramento e Análise Climática*. Edição comemorativa, s. I., v. 10a. Disponível em: [http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/cliesp10a/zcit\\_1.html](http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/cliesp10a/zcit_1.html)
- Fountoukis, C., Martín-Pomares, L., Perez-Astudillo, D., Bachour, D., Gladich, I., 2018. Simulating global horizontal irradiance in the Arabian Peninsula: Sensitivity to explicit treatment of aerosols, *Solar Energy*, v. 163, p. 347 – 355. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.02.00>
- Grell, G. A., Devenyi, D., 2002. A generalized approach to parameterizing convection, combining ensemble and data assimilation techniques. *Geophysical Research Letters*, v. 29, n. 14, p. 1693.
- Gueymard, C.A.; Jimenez, P.A., 2018. Validation of real-time solar irradiance simulations over Kuwait using WRF-solar. In: the 12th International Conference on Solar Energy for Buildings and Industry, EuroSun2018, Rapperswil, Switzerland.
- Hall, I., Prairie, R., Aderson, H., Boes, E., 1978. Generation of Typical Meteorological Years for 26 SOLMET Stations. SAND78-1601. Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories.
- Hong, S.Y., Lim, J.O.J., 2006. The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6). *Journal of Korean Meteorological Society*, v. 42, n. 2, p. 129-151.
- Jiménez, P. A., Hacker, J. P., Dudhia, J., Haupt, S. E, Ruiz-Arias, J. A., Gueymard, C. A., Thompson, G., Eidhammer, G., Deng, A., 2016: WRF-Solar: Description and clear-sky assessment of an augmented NWP model for solar power prediction. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 97, 1249-1264, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00279.1>.
- Kain, S. J., 2004. The Kain-Fritsch Convective Parameterization: An Update. *Journal of Applied Meteorology*, v. 43, p. 170-181.
- Kim, J. H., Jimenez, P. A., Dudhia, J., Yang, J., Sengupta, M., Xie, Y., 2020. Probabilistic Forecast of All-Sky Solar Radiation Using Enhanced WRF-Solar: Preprint. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/CP-5D00-77693.
- Kim, J. H.; Jimenez, P. A., Sengupta, M., Yang, J., Dudhia, J., Alessandrini, S., Xie, Y., 2022. The WRF-Solar Ensemble Prediction System to Provide Solar Irradiance Probabilistic Forecasts. *Journal of Photovoltaics*, v.12, n. 1.

- Lara-Fanego, V., Ruiz-Arias, J.A., Pozo-Vásquez, D., Santos-Alamillos, F.J.; Tovar-Pescador, J., 2012. Evaluation of the WRF model solar irradiance forecasts in Andalusia (southern Spain). *Solar Energy*, Amsterdam, v. 86, p. 2200-2217.
- Long, C. N., Shi, Y., 2008. “An Automated Quality Assessment and Control Algorithm for Surface Radiation Measurements”, *The Open Atmospheric Science Journal*, v.2, n.1, p.23–37. doi: 10.2174/1874282300802010023.
- Mlawer, E.J., *et al.*, 1997. Radiative Transfer for Inhomogeneous Atmospheres: RRTM, a Validated Correlated-k Model for the Longwave. *Journal of Geophysical Research*, 102, 16663. <https://doi.org/10.1029/97JD00237>
- Monfort, E. *et al.*, 2018. Atlas Solar Bahia, Curitiba: Camargo Schubert; Salvador: SECTI, SEINFRA, CIMATEC/SENAI, Brazil, 76p.
- Nakanish, M.; Niino, H., 2006. An Improved Mellor-Yamada Level-3 Model: Its Numerical Stability and Application to a Regional Prediction of Advection Fog. *Boundary Layer Meteorology*, v. 119, n. 2, p. 397-407.
- Nobre, M. T. C. M. *et al.*, 2022. Atlas Eólico e Solar do estado do Rio Grande do Norte, Natal: Instituto SENAI de Inovação – Energias Renováveis (ISI-ER); Natal: Governo do Estado do Rio Grande do Norte, SEDEC, COORDENADORIA DE DESENVOLVIMENTO ENERGÉTICO, 212p.
- Otto, S.A., Kadin, M., Casini, M., Torres, M.A. & Blenckner, T., 2018. A quantitative framework for selecting and validating food web indicators. *Ecological Indicators*, vol. 84, pp. 619-631, doi: [10.1016/j.ecolind.2017.05.045](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.05.045)
- 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., 2017. Atlas brasileiro de energia solar. 2.ed. São José dos Campos: INPE. 80p. Disponível em: <http://doi.org/10.34024/978851700089>
- Sengupta, M. *et al.*, 2018. “The national solar radiation data base (NSRDB),” *Renewable Sustain. Energy Rev.*, vol. 89, pp. 51–60.
- Skamarock, W. C. A *et al.*, 2021. Description of the Advanced Research WRF Model Version 4. NCAR/TN–556+STR NCAR TECHNICAL NOTE.
- Skeiker, K., 2006. Comparison of Methodologies for TMY Generation Using 10 Years Data for Damascus, Syria. Damascus, Syria: Department of Scientific Services.
- Tewari, M., Wang, W., Dudhia, J., LeMone, M. A., Mitchell, K., 2005. NUMERICAL EXPERIMENTS WITH UPGRADED WRF/NOAHL5 MODEL.
- Thaker, J.A., Höller, R., 2023. Evaluation of High Resolution WRF Solar. Energies.
- Vilhena, J. E. S., Lima, R. B., Freitas, S. J. L., 2018. Climatologia do Amapá: quase um século de história. Rio de Janeiro: Gramma, 100p.
- Wilcox, S., Marion, W., 2008. Users Manual for TMY3 Data Sets. National Renewable Energy Laboratory.
- Wilks, D. S., 2006. Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. International Geophysics Series. 2a. Edição, Estados Unidos da América, Academic Press, v. 91, 627 p.
- Yang, J., Manojit, S., Yu, X., Jimenez, P. A., Ju-Hye, K., 2019. Adjoint Sensitivity of FARMS to the Forecasting Variables of WRF-Solar: Preprint. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/CP-5D00-74756.
- Zempila M.-M., Giannaros T.M., Bais A. and Melas D., 2016. Evaluation of WRF shortwave radiation parameterizations in predicting global horizontal irradiance in Greece. *Renew. Energ.* 86, 831-840. doi: 10.1016/j.renene.2015.08.057

## PERFORMANCE OF THE HIGH-RESOLUTION WRF-SOLAR IN ESTIMATING GLOBAL HORIZONTAL IRRADIANCE IN THE CITY OF MACAPÁ-AP.

**Abstract.** *The diversification of the energetic matrix brings different benefits, and photovoltaic solar energy is a promising source of energy due to its scalability and modularity. The state of Amapá is located in the tropical region, where it receives a large amount of solar energy throughout the year. However, the lack of studies into the region's solar potential hinders the expansion of photovoltaic systems in the state. In assessing solar resources, atmospheric models have emerged as a key tool, such as the Weather Research Forecast (WRF). Version 4.3.1 of the WRF-Solar model, a specific version for solar energy applications, was used to simulate the Global Horizontal Irradiance (GHI) of the city of Macapá-AP, in the northern of Brazil. The objective was to show preliminary results on the efficiency of the WRF-Solar model in estimating the seasonal GHI for the city of Macapá-AP, as well as to check whether a higher resolution improves the results of the simulations. The Typical Meteorological Year (TMY) was calculated using the Sandia method. The algorithm proposed by the Baseline Surface Radiation Network (BSRN) was used to process hourly data from the automatic meteorological station (EMA) of the National Institute of Meteorology (INMET) in the city of Macapá-AP. Two cumulus parameterizations were used to represent the region's climate. Input data from 1-hourly ERA5 reanalysis was used. The use of high-resolution data reduced the nRMSE of the GHI, especially during spring, from 22% to 17%. The reduction in RMSE was approximately 48.37 W.m<sup>-2</sup> in spring. The high resolution WRF-Solar simulations showed more efficient estimates.*

**Keywords:** *Atmospheric Modeling, Solar Energy, Northern Region*