

PREVISÃO DE CURTO PRAZO DA IRRADIANÇA GLOBAL HORIZONTAL NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO SOB DIFERENTES CONDIÇÕES DE NEBULOSIDADE USANDO O MODELO WRF-SOLAR

Diogo Nunes da Silva Ramos¹ - diogo.ramos@fieb.org.br
Francisco José Lopes de Lima¹ - franciso.lopes@fieb.org.br
Arthur Lúcido Cotta Weyll¹ - arthurlcw@gmail.com
Thalyta Soares dos Santos¹ - thalyta.santos@fieb.org.br
Yasmin Kaore Lago Kitagawa¹ - ykaore@gmail.com
William Duarte Jacondino¹ - william.jacondino@fbter.org.br
Allan Rodrigues Silva¹ - allan.silva@fieb.org.br
Allan Cavalcante Araújo¹ - allancavalcante@gmail.com
Luana Kruger Melgaço Pereira¹ - luanakrugerk@gmail.com
Armando Temporal Neto² - armandot@chesf.com.br
Rizzieri Pedruzzi³ - rpedruzzi@eng.uerj.br
Davidson Martins Moreira¹ - davidson.moreira@fieb.org.br

¹Centro de Supercomputação para Inovação Industrial (CS2I). Campus Integrado de Manufatura e Tecnologia - SENAI CIMATEC. Salvador – BA

²Companhia Hidroelétrica do São Francisco – CHESF, Recife – PE

³Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro - RJ

Resumo. O presente trabalho teve por objetivo avaliar as previsões de irradiância global horizontal (GHI) de até 48h à frente do modelo WRF-Solar no Centro de Referência em Energia Solar da Eletrobras Chesf, localizada no município de Petrolina (PE), o CRESF, para o período de julho de 2020 e outubro de 2020, meses de menor e maior incidência de radiação solar na região, respectivamente. O estudo abordado enfoca o desenvolvimento e implementação de metodologias para a previsão de radiação solar empregando os modelos WRF em suas versões controle (WRF-CTL) e solar (WRF-Solar), com foco na região de Petrolina-PE. Ambas as versões do WRF foram comparadas através de métricas como BIAS, RMSE e coeficiente de correlação R. O WRF-Solar mostrou-se superior na precisão das previsões, em particular, conseguindo representar com maior acurácia condições de céu nublado e céu claro, apesar de apresentar um coeficiente R ligeiramente inferior ao WRF-CTL. A parametrização de nuvens híbridas e o tratamento de nuvens rasas do WRF-Solar podem ter sido determinantes para seu melhor desempenho. Entretanto, ambos os modelos enfrentaram desafios na representação do ciclo diurno de GHI, com dificuldades marcantes nas horas da manhã, atribuídas à complexidade na determinação numérica de nuvens. Os resultados, alinhados com a literatura existente, fornecem uma validação sólida da aplicabilidade do WRF-Solar para previsões de curto prazo em condições climáticas específicas. No entanto, é crucial notar que essa validação se aplica ao contexto específico da região estudada, ressaltando a necessidade de mais pesquisas e validações em diversas condições climáticas e geográficas para aprimorar a eficácia e abrangência do modelo. Além disso, a pesquisa indica que a correção de viés e a calibração adicional dos modelos são áreas promissoras para futuras investigações. Essas medidas podem contribuir significativamente para mitigar erros sistemáticos e aprimorar a acurácia das previsões em estudos subsequentes.

Palavras-chave: GHI, Modelo WRF, Previsão solar.

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento e a aplicação de metodologias para previsão da radiação solar têm progredido consideravelmente nas últimas décadas. Para cada horizonte de previsão existem diferentes abordagens mais apropriadas, com suas vantagens e limitações. Entretanto, não há um consenso universal na literatura sobre os intervalos temporais de cada um destes horizontes de previsão. Ahmed *et al.* (2020) revisaram o estado da arte deste contexto da previsão de radiação solar, mencionando que os horizontes usualmente citados na literatura são denominados de curtíssimo, curto, médio e longo prazo. A delimitação de cada um deles varia de acordo com os critérios de cada autor ou estudo. Por exemplo, os autores reportam que a previsão de curto prazo é aquela com horizonte de 30 a 360 minutos em alguns estudos, ou de até 1 a 7 dias para outros. Já para médio prazo, Ahmed *et al.* (2020) também citaram trabalhos cujo intervalo de horizonte máximo varia entre 6 e 24 horas, ou ainda, de 1 semana até 1 mês. Diagne *et al.* (2013) também revisam este contexto, concentrando-se nas diferentes técnicas e horizontes para previsão, indicando que nos horizontes de algumas horas para

dias os modelos de previsão numérica de tempo (PNT ou NWP, em inglês) são os mais aplicados. O presente trabalho assume como horizonte de curto prazo de até 48 horas. Uma das soluções fundamentais para prever a radiação solar a curto e médio prazo é o uso de ferramentas computacionais, notadamente os modelos de PNT. Entre esses modelos, o *Weather Research and Forecasting* – WRF, destaca-se como um dos mais amplamente adotados na literatura, reconhecido por sua versatilidade computacional, comunidade robusta de usuários e capacidade de incorporar o estado da arte em soluções numéricas para as equações que governam o movimento na atmosfera (Powers *et al.*, 2017). A acurácia das previsões do WRF é afetada por fatores locais, como topografia, presença de obstáculos e condições de superfície. Além disso, as informações acuradas sobre a distribuição espacial e temporal de nuvens e aerossóis atmosféricos é crucial para melhorar as previsões de radiação solar (Jiménez *et al.*, 2016). Diante do exposto acima, o presente estudo teve como objetivo avaliar a acurácia do modelo WRF em prever irradiação solar até 48h à frente, comparando ambas as versões WRF-Solar e WRF, a fim de verificar o impacto e o possível ganho que a física da versão WRF-Solar pode agregar na previsão de curto prazo da irradiação solar na região de estudo.

2. METODOLOGIA

O desenvolvimento deste trabalho fez uso de duas classes de dados meteorológicos, as medições obtidas na estação solarimétrica e os dados numéricos das previsões do modelo WRF. A estação observacional está instalada no Centro de Referência em Energia Solar de Petrolina – CRESF da Eletrobras Chesf, localizada no município de Petrolina (PE). O período estudo refere-se aos meses completos de julho de 2020 e de outubro de 2020, por serem os meses de menor e maior potencial solarimétrico do local, respectivamente. Em relação aos dados numéricos, duas versões do modelo foram usadas para gerar as previsões de curto prazo de GHI, WRF padrão, aqui denominado de controle (WRF-CTL), e o WRF-Solar. Ambas as versões usadas do WRF são referentes ao lançamento 4.4.1 de agosto/2021, cujo código fonte é disponibilizado gratuitamente no seu repositório oficial <https://github.com/wrf-model/WRF>. As condições iniciais e de fronteira do WRF foram as previsões globais do modelo GFS. As previsões globais do modelo GFS foram usadas como condições iniciais e de fronteira do WRF, considerando apenas o ciclo de assimilação de dados de 00 UTC, resolução horizontal de 0.25° e temporal de 3 horas. Os dados de uso e ocupação do modelo também foram atualizados para uso da base do MapBiomass, cuja resolução horizontal de 90m e informações referentes à 2019 foram classificadas seguindo a tabela do MODIS como referência (Pedruzzi *et al.* 2022). Por fim, os dados de topografia usados também foram alterados para a base do modelo digital de elevação SRTM da NASA, com resolução espacial de 90 m.

As configurações particulares do WRF-Solar relacionadas com nuvens híbridas, nuvens de camada limite, aerossol climatológico e o feedback completo nuvem-radiação-aerossol são ativadas diretamente no *namelist* do modelo. Estas particularidades do WRF-Solar seguiram as recomendações dos desenvolvedores do modelo, disponíveis em <https://ral.ucar.edu/solutions/products/WRF-Solar>. A

Figura 1 mostra a delimitação espacial do domínio WRF, assim como, a diferença entre as informações originais e atualizadas de uso e ocupação do solo do modelo. Embora a figura apresente 5 domínios do WRF, este trabalho fez uso apenas da informação do domínio *d01*, com resolução de 9 km. Por fim, a lista de parametrizações físicas usadas no WRF é apresentada na Tabela 1. Foi calculado também o índice de claridade k^* , aqui calculada pela razão de GHI e GHI de céu claro de Ineichen e Perez (2002), para classificar as condições de nebulosidade como: *céu claro* ($k^* > 0,7$); *parcialmente nublado* ($0,4 < k^* < 0,7$); *nublado* ($k^* < 0,4$).

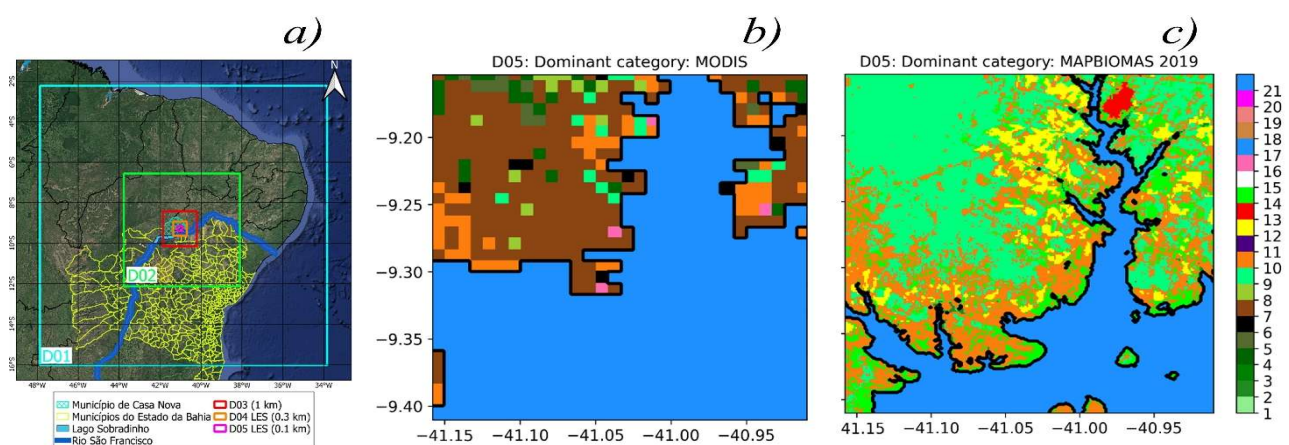


Figura 1. (a) Localização geográfica dos 5 domínios aninhados do WRF centrados sobre Casa Nova - BA e a localização geográfica dos pontos de interesse. Representação espacial das informações de uso e cobertura do solo originais (b) do modelo WRF e atualizadas (c).

Tabela 1. Esquemas das parametrizações físicas adotados nas previsões com as três configurações do modelo WRF. A exceção é que no WRF-Solar não se usou a parametrização de cumulus por conta da ativação das nuvens híbridas de Deng.

Parametrização	Esquemas
Radiação de onda longa	RRTMG (opção 4)
Radiação de onda curta	RRTMG (opção 4)
Modelo de superfície	Noah <i>land-surface model</i> (opção 2)
Microfísica de nuvens	Purdue Lin (opção 2)
Cumulus	Kain–Fritsch (KF) (opção 1)
Camada limite planetária (PBL)	MYNN2.5 (opção 5)
Camada limite superficial (SL)	MYNN (opção 5)

A avaliação da acurácia das previsões do modelo WRF foi realizada a partir das métricas estatísticas convencionais de comparação entre as estimativas (modelo) e observações (dados do CRESP) no local estudado. Nas formulações das métricas a seguir, o termo y_i representa o valor verdadeiro (ou observado), \hat{y}_i indica o valor previsto pelo modelo, n é o número total de amostras, \underline{y} é a média dos valores verdadeiros/observados, $\underline{\hat{y}}$ é a média dos valores previstos:

Erro médio (BIAS):

$$BIAS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i) \quad (1)$$

Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (2)$$

Raiz do Erro Quadrático Médio Normalizado (NRMSE):

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i} \quad (3)$$

Coefficiente de correlação de Pearson (R):

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \underline{y})(\hat{y}_i - \underline{\hat{y}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \underline{y})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \underline{\hat{y}})^2}} \quad (4)$$

3. RESULTADOS

O desenvolvimento diário das observações e previsões de curto prazo de GHI dos modelos WRF-CTL e WRF-Solar, com resolução temporal de 30 minutos, é apresentado na Figura 2 para os meses de junho e de outubro/2020. Na figura foi adicionada também as ocorrências de céu parcialmente nublado e nublado, indicados pelo o parâmetro k^* . Por ser o mês com menor potencial solarimétrico da região, a maior intermitência de GHI observada em junho ocorre justamente por conta de a nebulosidade da região ser mais frequente neste período, como esperado. Em relação à magnitude de GHI, a observação alcançou pouco mais de 800 W/m² nos dias de céu claro, cujas previsões das versões do WRF conseguiram acompanhar bem o ciclo temporal medido nestes períodos. Porém, as previsões indicaram dificuldade em determinar GHI em vários dias indicados com céu parcialmente nublado, como os dias 6, 7, 13 e 30. Comparando o desempenho dos modelos entre si, na maioria dos casos eles foram equivalentes, com uma maior tendência de superestimativa de GHI observado do WRF-CTL em relação ao WRF-Solar. Contudo, houve casos particulares onde os modelos diferiram em torno de 500 W/m² entre si, como nos dias 3, 12 e 16 de junho.

Em relação ao mês de outubro, mês tipicamente de céu claro e com maior potencial solar da região, a previsão de GHI foi bastante similar entre os modelos, novamente com pequena superestimativa do WRF-CTL em comparação ao WRF-Solar na maioria dos dias. A intensidade observacional de GHI ultrapassa 1000 W/m² nos dias de céu claro, cujo comportamento foi bem previsto pelo WRF-Solar, principalmente. Diferentemente de junho, ocorreram alguns períodos de condição de céu nublado durante outubro, principalmente a partir do dia 22 em diante, com destaque ao dia 27. Durante estes dias, o WRF-Solar se comportou de modo oposto ao WRF-CTL em algumas situações, ora superestimando, ora subestimando as medições de GHI. Sendo assim, se faz necessário avaliar a série temporal destes mesmos meses, mas agora considerando o BIAS dos modelos.

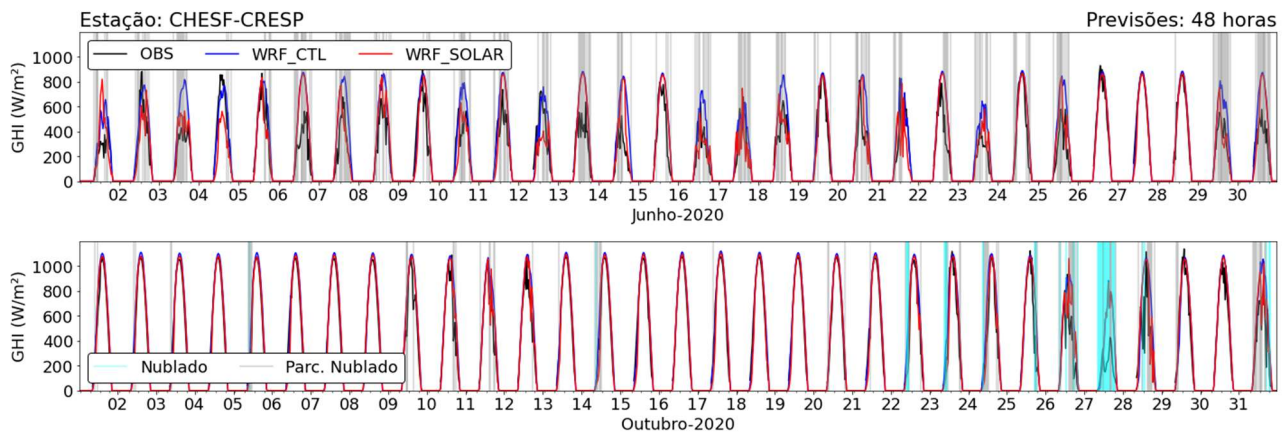


Figura 2. Evolução diária das previsões de curto prazo (até 48h) de GHI dos modelos WRF-CTL e WRF-Solar nos meses de junho/2020 (superior) e outubro/2020 (inferior) para a estação solarimétrica CHESF-CRESP. As condições de céu parcialmente nublado e nublado são representadas pelas linhas verticais nas cores azul e cinza, respectivamente.

No contexto geral, nos instantes de céu nublado ou parcialmente nublado, o erro das previsões apresentou comportamentos distintos entre WRF-CTL e WRF-Solar, como nos dias 16/junho e 31/outubro. Um comportamento também visto nestas séries temporais de BIAS (figura não mostrada) foi o padrão de subestimativas durante a manhã e superestimativas à tarde durante dias de céu claro e alguns com presença de nebulosidade, para ambos os modelos. Este tipo de dificuldade dos modelos está intrinsecamente associado com o ciclo de vida das nuvens e com as próprias limitações naturais de uma parametrização física. Primeiro, o processo de formação, maturação e dissipação de nuvens relaciona diferentes processos atmosféricos que envolvem a maioria das parametrizações de um modelo, de modo direto ou indireto. Considerando o período de junho, a presença desta nebulosidade esteve relacionada, na maioria dos dias, com sistemas meteorológicos de grande a mesoescala que atuaram sobre o nordeste brasileiro. Já em outubro, a maioria das nuvens identificadas nos primeiros 20 dias teve uma natureza convectiva mais local, provavelmente formadas durante o ciclo de desenvolvimento da camada limite planetária, sendo denominadas pela literatura como *nuvens de camada limite* (Mahrt, 1991; Yamaguchi *et al.*, 2013).

A dispersão entre observações e previsões de curto prazo de GHI é agora analisada na Figura 3, segmentada por diferentes condições de nebulosidade e com suas respectivas métricas de BIAS, RMSE e coeficiente de correlação R. O padrão de superestimativas de ambos os modelos, tanto para junho quanto para outubro, é evidente quando há presença de nebulosidade. Esta tendência é ainda maior para magnitudes de GHI acima de 400 W/m². A concentração das dispersões de GHI se mostrou maior com o WRF-CTL em ambos os meses, principalmente para céu nublado e parcialmente nublado. Os valores das métricas estatísticas calculados para cada condição de céu em previsões de até 48 horas também foram melhores, na maioria dos casos, que o WRF-Solar.

O comportamento durante outubro indica uma predominância da concentração de pontos sobre a linha de tendência perfeita para o critério de céu claro ($k^* > 0.7$), cuja correlação de ambos os modelos foi superior a 95%. Nas demais condições de céu, o parâmetro R do WRF-CTL foi até 11% melhor que o WRF-Solar. Contudo, vale ressaltar que o reduzido tamanho amostral destes casos não permite assegurar que este desempenho do WRF-CTL é predominante em relação ao WRF-Solar também em outras épocas do ano. Além disto, as configurações particulares usadas no WRF-Solar seguiram as recomendações da documentação oficial do modelo, como foi descrito na seção metodológica. Porém, é conhecido que estas recomendações são geralmente baseadas em dados solarimétricos observados nos Estados Unidos e/ou Europa, cujas condições atmosféricas e geográficas são bem diferentes da região semiárida do nordeste brasileiro. Porém, um estudo de calibração destes parâmetros adicionais é uma atividade que está fora do escopo deste artigo, visto que seria necessário, além de maior tempo de execução da pesquisa, ter uma base de dados observacionais maior e mais detalhada, como medições de aerossóis atmosféricos, albedo, estações solarimétricas em outras regiões etc.

Uma das principais contribuições do WRF-Solar é sua parametrização física de nuvens rasas. Neste modelo, a configuração destas nuvens é geralmente denominada de *híbrida*, pois resolve numericamente também as fases transitórias entre nuvens rasas e profundas (Deng *et al.* 2003; Jiménez *et al.* 2016). Estas configurações dos modelos permitem compreender o motivo das previsões do WRF-Solar ter sido mais próxima das observações nos intervalos onde a diferença entre modelos foi alta. Contudo, é importante destacar também que a natureza física do ciclo de vida das nuvens, assim como diversos processos atmosféricos, é caótica e sua previsibilidade é altamente complexa.

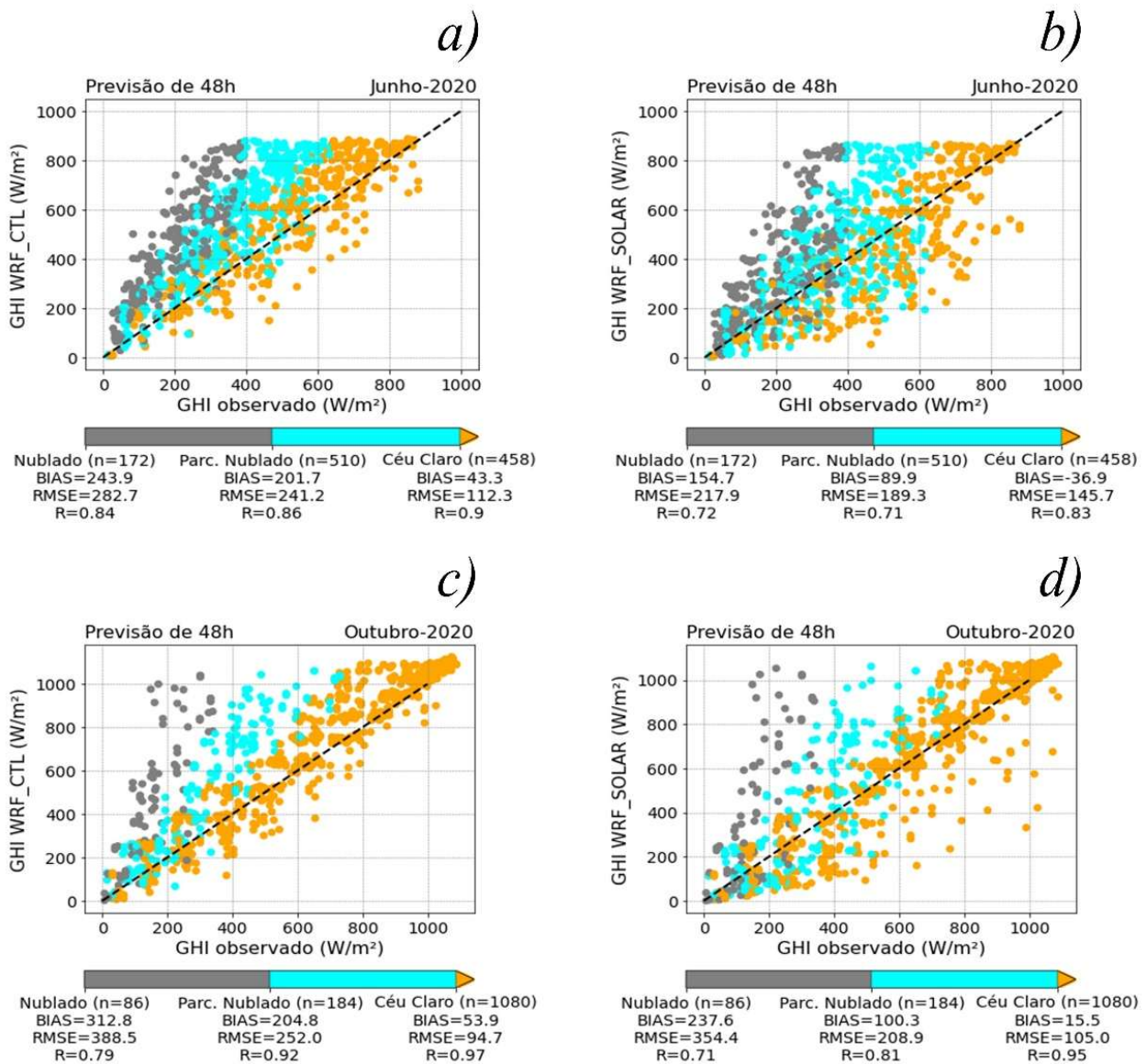


Figura 3. Dispersão entre observações e previsões de curto prazo (de 0,5 a 48h) de GHI nos meses de junho e outubro dos modelos WRF-CTL e WRF-Solar para diferentes condições de céu com suas respectivas métricas estatísticas

Para entender melhor estas diferenças entre os modelos, um estudo de caso da previsão de 36h de 12UTC 16/junho/2020, ou seja, inicializada em 00UTC 15/junho/2020 é avaliado considerando o campo espacial de GHI, índice de claridade k^* e precipitação total, conforme mostrado na Figura 4. Vale reforçar que este caso foi aquele onde houve a maior diferença entre as previsões do WRF-CTL com o WRF-Solar, sendo este último aquele que conseguiu reproduzir o GHI observado com maior acurácia. Nota-se na região central da Bahia que há uma redução de GHI do WRF-Solar bem mais intensa (previsão inferior a 200 W/m^2) que o WRF-CTL (previsão de 100 a 400 W/m^2), coincidindo com o campo de k^* indicando condições de céu nublado nesta zona. Em relação à precipitação, fica evidente que a associação direta da redução de GHI com precipitação não está totalmente correta. O principal motivo é que nem toda nuvem possui condições termodinâmicas que resultem em ocorrência de precipitação, mas diferentes tipos de nuvens, inclusive aquelas de bom tempo e sem desenvolvimento convectivo, podem afetar consideravelmente na redução de GHI. Neste sentido, é possível identificar ainda a maior sensibilidade do WRF-Solar em representar as diferentes condições de claridade do céu em comparação ao WRF-CTL. A parametrização de nuvens híbridas do WRF-Solar, baseadas no trabalho de Deng *et al.* (2003), traz uma abordagem física robusta que destaca não apenas os efeitos das nuvens convectivas na radiação solar, mas também das nuvens rasas, cujo regime climatológico do semiárido nordestino permite a formação dessas condições.

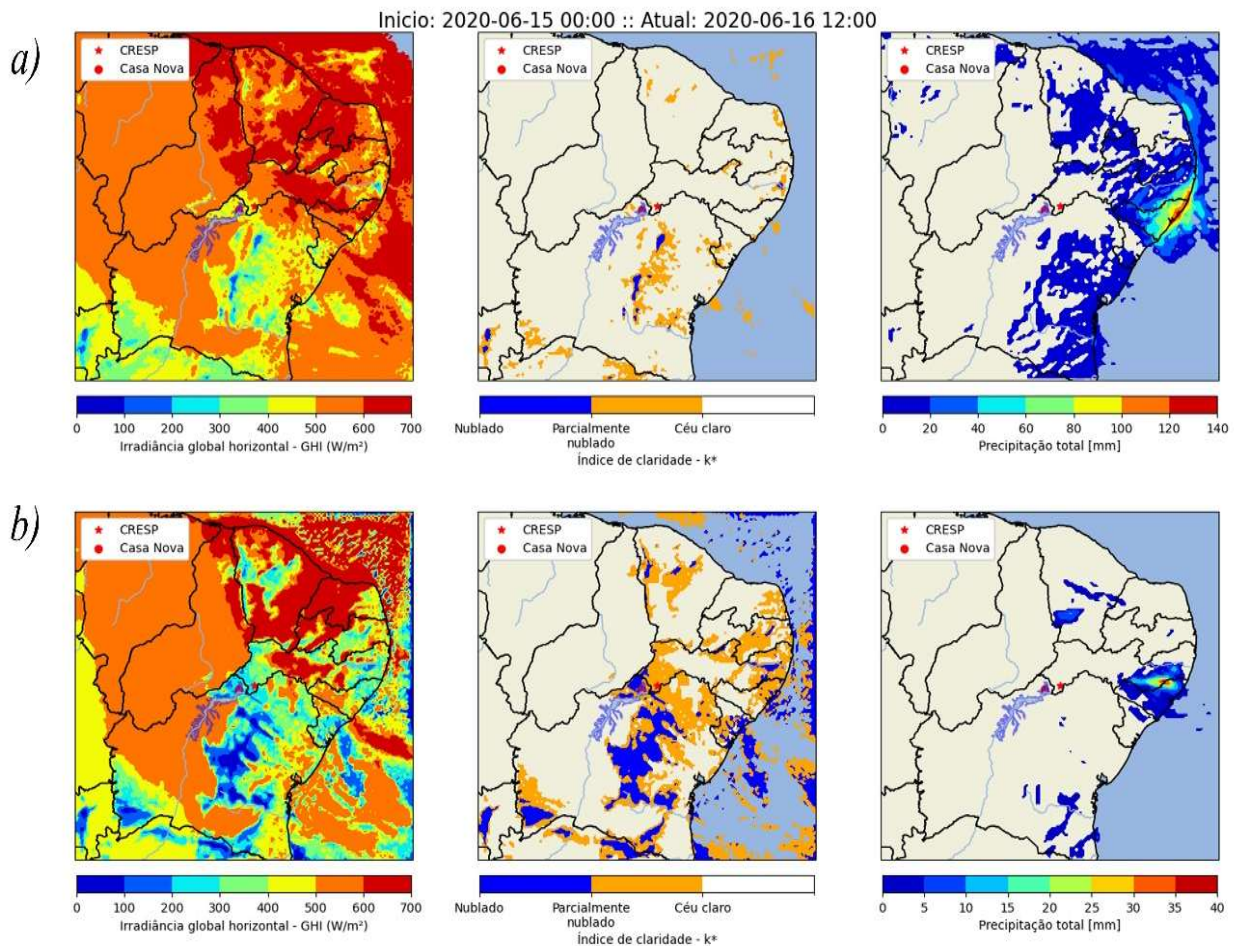


Figura 4. Mapas das previsões de 36 horas dos parâmetros GHI, índice de claridade (k^*) e precipitação total dos modelos WRF-CTL (a) e WRF-solar (b).

Por fim, o perfil vertical da fração de cobertura de nuvens para a previsão de curto prazo inicializada em 00UTC 15/junho/2020 é mostrado na Figura 6 para ambos os modelos WRF sobre o ponto de grade mais próximo da estação CRESP. Este resultado comprova a predominância da cobertura de nuvens abaixo de 2 km de altura, cuja concentração (i.e., valores mais próximos de 100%) foi maior com o WRF-Solar. Uma outra característica identificada é que a estrutura espaço-temporal das nuvens do WRF-CTL no dia 16/junho é mais suavizada, se formando durante a manhã e intensificando sua concentração no meio da tarde, dissipando até o final da noite do mesmo dia. Neste mesmo intervalo de tempo, o WRF-Solar mostrou uma menor sensibilidade deste ciclo de vida das nuvens baixas, principalmente na sua fase de dissipação noturna.

As métricas gerais comprovam a qualidade geral do WRF-Solar frente ao WRF-CTL para previsão de curto prazo do GHI, conforme apresentado na Tabela 2. A única exceção foi a métrica R, cujos resultados do WRF-CTL foram um pouco melhores com o WRF-Solar. O ganho percentual do WRF-Solar foi superior a 71% na redução do BIAS em junho, enquanto este valor para outubro foi de 57%. Em relação à dispersão do erro, o WRF-Solar melhorou o RMSE em 14% e em 4% para junho e outubro, respectivamente. Sobre o ajuste linear entre previsões e observações indicada pela correlação, o coeficiente de Pearson do WRF-CTL foi melhor do que o WRF-Solar em cerca de 6% para junho e 2% para outubro.

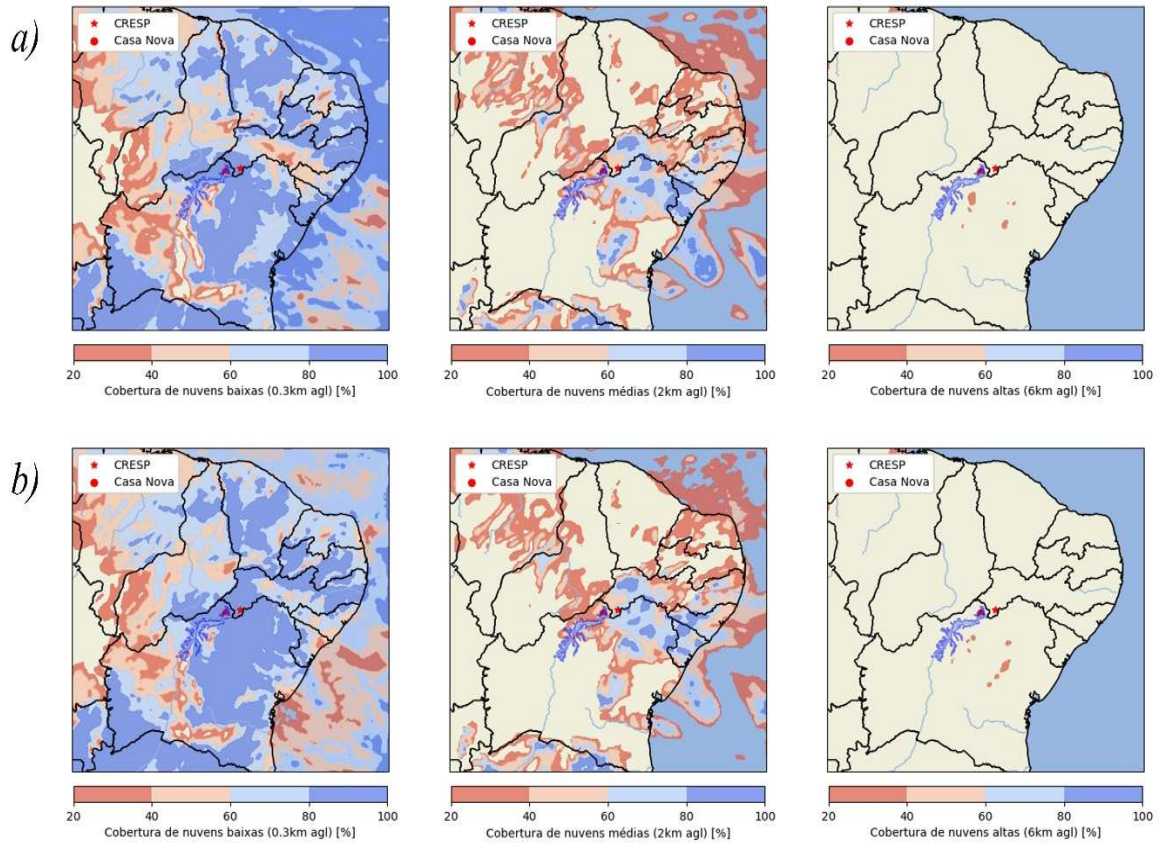


Figura 5. Mapas das previsões das coberturas de nuvens baixas, médias e altas do modelo WRF-CTL (a) e WRF-solar (b) para o mesmo caso da figura anterior.

Além da intercomparação estatística entre os modelos, é essencial também validar seus desempenhos com a literatura. Então, os estudos de Jiménez *et al.* (2016, 2022a) e Blaga *et al.* (2019) são aqui usados como *benchmark* de referência. Jiménez *et al.* (2016) fizeram a primeira validação geral do WRF-Solar para região continental dos Estados Unidos enquanto Blaga *et al.* revisaram mais de 1700 trabalhos relacionados com diferentes metodologias e horizontes de previsão solar na América do Norte, Europa, Ásia e Austrália. Jiménez *et al.* (2022a) obtiveram um BIAS do WRF-Solar sem o esquema de nuvens híbridas entre -20 a 80 W/m², mas quando a parametrização é ativada, assim como foi feito neste trabalho, o BIAS é reduzido para o intervalo de -15 a 45 W/m² considerando 14 estações nos EUA. Os autores mostraram ainda que, em média, o WRF-Solar trouxe uma melhoria do RMSE nas previsões de GHI em 46% nos períodos de céu claro, enquanto o resultado aqui obtido foi superior a 57% (em outubro). Blaga *et al.* (2019) indicam que os artigos relacionados com modelos numéricos, como o WRF, apresentam um NBIAS entre -5 a 10% e NRMSE em torno de 30 a 45%. No presente trabalho, o NBIAS do WRF-Solar variou entre 6% (outubro) a 9% (junho), enquanto o NRMSE entre 45% (junho) a 26% (outubro).

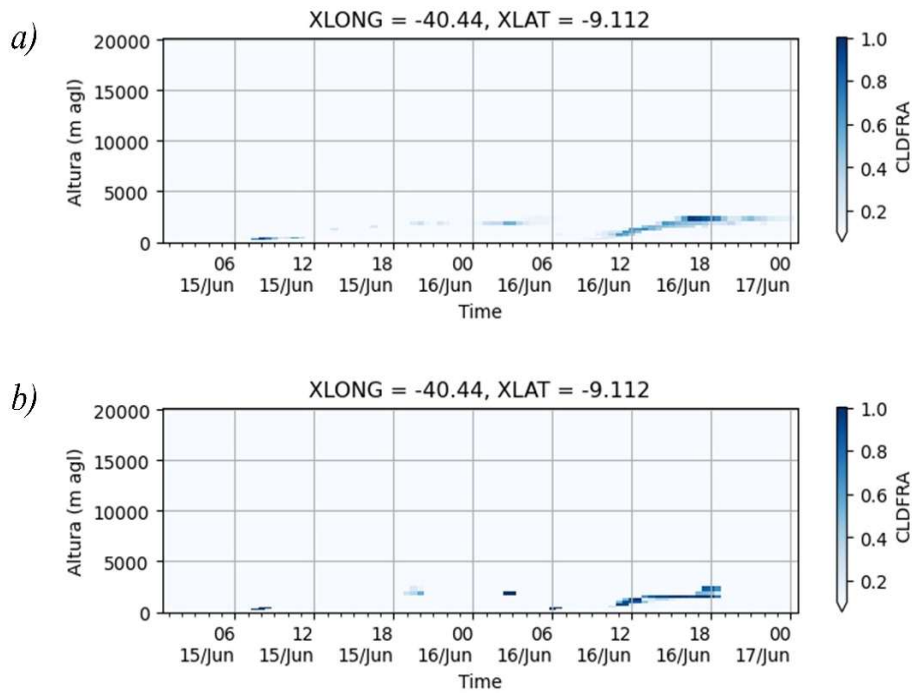


Figura 6. Seção vertical-temporal da cobertura de nuvens (CLDFRA) das previsões de curto prazo com WRF_SCTL (a) e WRF-solar (b) no ponto de grade mais próximo do CRESP.

Tabela 2. Resumo estatístico das configurações do WRF testadas considerando todas as previsões de curto prazo nos meses de junho e outubro de 2020 na estação solarimétrica do CRESP.

Métricas	Junho/2020		Outubro/2020	
	WRF-CTL	WRF-Solar	WRF-CTL	WRF-Solar
BIAS (W/m²)	124,11	35,68	82,89	35,21
RMSE (W/m²)	197,34	172,15	153,11	147,71
NRMSE	0,5138	0,4482	0,2650	0,2557
R	0,7958	0,7537	0,9316	0,9180

A representação adequada dos diferentes tipos e ciclos de nuvens é um dos maiores desafios da comunidade científica que pesquisa e desenvolve modelos de previsão numérica de tempo e clima (Hong e Dudhia, 2012). É possível sugerir que esta formação de nuvens possui uma relação direta com o ciclo de desenvolvimento da camada limite planetária (CLP) local. A confirmação desta hipótese exigiria um estudo extenso e detalhado, que demandaria também uma maior distribuição espacial e temporal de dados observacionais (i.e., radiossondas, SODAR, LIDAR etc.), sobre a estrutura termodinâmica da CLP. As configurações particulares de nuvens de CLP do WRF-Solar provavelmente exerceram um impacto importante neste resultado, visto que tais parametrizações fazem uso do fechamento de turbulência úmida (Hong *et al.*, 2006). Por exemplo, Thaker e Höller (2023) usaram o WRF-Solar em alta resolução para reforçar que nem sempre os erros sistemáticos de GHI do modelo estão relacionados com o mesmo tipo de nuvem. Jiménez *et al.* (2022b) desenvolveram uma abordagem para o curtíssimo prazo usando imagens de satélite para reduzir as incertezas relacionadas com as nuvens, acoplado características do sistema MADCast no WRF-Solar, criando o sistema MAD-WRF. Segundo os autores, a adição de dados de satélite para corrigir o perfil de umidade nas horas iniciais das previsões a partir do sistema MAD-WRF resultou em importantes benefícios na qualidade das previsões de GHI em várias regiões dos Estados Unidos. A comparação geral dos resultados aqui obtidos com a literatura assegura a qualidade do WRF-Solar para previsão de curto prazo de GHI na região estudada, considerando os períodos estudados de junho e outubro. Mas claro, deve-se considerar que para uma maior consistência estatística destas métricas, aumentar o tamanho amostral das previsões é uma das principais atividades futuras que podem ser executadas para melhor entender as particularidades entre os modelos.

4. CONCLUSÕES

Este trabalho avaliou a previsão de curto prazo de GHI em horizontes de até 48 horas através dos modelos WRF-CTL e WRF-Solar durante os meses de menor (junho/2020) e maior (outubro/2020) na estação solarimétrica da Eletrobras Chesf em Petrolina-PE. O modelo WRF-Solar obteve um melhor desempenho global em prever GHI em relação ao WRF-CTL. Ambos os modelos indicaram uma acentuada variação temporal do erro entre os meses estudados e em determinadas fases do ciclo diurno de GHI. Esta dificuldade já era esperada por conta do desafio em determinar numericamente as nuvens com qualidade, sendo este o principal fator para a maior amplitude de BIAS durante junho e a maior variação de BIAS durante as horas da manhã de outubro. Além disso, os resultados estão consistentes com a literatura, indicando que o WRF-Solar é uma ferramenta adequada para previsão de curto prazo de GHI na região estudada. No entanto, é importante destacar a necessidade de mais pesquisas e validações em outras regiões e condições climáticas para confirmar a eficácia do modelo. Por exemplo, estas limitações em determinados horários e condições meteorológicas específicas podem ser um erro sistemático do modelo, o que poderia ser removido futuramente usando técnicas de correção de viés, por exemplo. Nos estudos de casos apresentados pôde-se observar que o GHI é altamente dependente das condições de nebulosidade (k^*) imposta pelo modelo. Nos dias em que o modelo assume a ausência ou condições de nebulosidade condizente com o observado, os valores de GHI do modelo apresentam melhor desempenho. Estudos futuros devem considerar a validação do modelo em outras regiões, avaliar um tamanho amostral de dados maior e testar a versão do MAD-WRF, que corrige a inicialização das nuvens por imagens de satélite, em ambientes de diferentes condições de nebulosidade.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF) pelos dados observacionais compartilhados e suporte técnico e financeiro para a pesquisa (Convênio CV-I-70.20.221.00). Ao Centro de Supercomputação para Inovação Industrial (CS2i) do SENAI CIMATEC pelo suporte técnico-científico, financeiro e de supercomputação para a execução do projeto. E à Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) pelo suporte técnico e incentivos à pesquisa das Usinas Híbridas.

REFERÊNCIAS

- Ahmed, R., Sreeram, V., Mishra, Y., Arif, M. D., 2020. A review and evaluation of the state-of-the-art in PV solar power forecasting: Techniques and optimization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 124 (February).
- Blaga, R., Sabadus, A., Stefu, N., Dughir, C., Paulescu, M., Badescu, V., 2019. A current perspective on the accuracy of incoming solar energy forecasting. *Progress in Energy and Combustion Science*, 70, 119–144.
- Deng, A., N. L. Seaman, and J. S. Kain, 2003. A shallow-convection parameterization for mesoscale models. Part I: Submodel description and preliminary applications. *J. Atmos. Sci.*, 60, 3456.
- Diagne, M., David, M., Lauret, P., Boland, J., & Schmutz, N., 2013. Review of solar irradiance forecasting methods and a proposition for small-scale insular grids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 65–76.
- Hong, S.-Y., & Dudhia, J., 2012. Next-Generation Numerical Weather Prediction: Bridging Parameterization, Explicit Clouds, and Large Eddies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(1), ES6–ES9.
- Hong, S.-Y., Noh, Y., & Dudhia, J., 2006. A New Vertical Diffusion Package with an Explicit Treatment of Entrainment Processes. *Monthly Weather Review*, 134(9), 2318–2341.
- Ineichen, P. Perez, R. 2002. A New air mass independent formulation for the Linke turbidity coefficient. *Solar Energy*, v. 73, pp. 151-157.
- Jiménez, P. A., Hacker, J. P., Dudhia, J., Haupt, S. E., Ruiz-Arias, J. A., Gueymard, C. A., Thompson, G., Eidhammer, T., & Deng, A., 2016. WRF-Solar: Description and Clear-Sky Assessment of an Augmented NWP Model for Solar Power Prediction. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 97(7), 1249–1264.
- Jiménez, P. A., Dudhia, J., Thompson, G., Lee, J. A., & Brummet, T., 2022a. Improving the cloud initialization in WRF-Solar with enhanced short-range forecasting functionality: The MAD-WRF model. *Solar Energy*, 239, 221-233.
- Jiménez, P. A., Yang, J., Kim, J. H., Sengupta, M., & Dudhia, J., 2022b. Assessing the WRF-Solar model performance using satellite-derived irradiance from the National Solar Radiation Database. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 61(2), 129-142.
- Mahrt, L., 1991. Boundary-layer moisture regimes. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 117(497), 151-176.
- Powers, J. G., Klemp, J. B., Skamarock, W. C., Davis, C. A., Dudhia, J., Gill, D. O., Coen, J. L., Gochis, D. J., Ahmadov, R., Peckham, S. E., Grell, G. A., Michalakes, J., Trahan, S., Benjamin, S. G., Alexander, C. R., Dimego, G. J., Wang, W., Schwartz, C. S., Romine, G. S., ... Duda, M. G., 2017. The Weather Research and Forecasting Model: Overview, System Efforts, and Future Directions. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(8), 1717–1737.
- Pedruzzi, R.; Andreão, W. L.; Baek, B. H.; Hudke, A. P.; Glotfelty, T. W.; Freitas, E. D.; Martins, J. A.; Bowden, J. H.; Pinto, J. A.; Alonso, M. F.; Albuquerque, T. T. 2022. A. Update of land use/land cover and soil texture for Brazil: Impact on WRF modeling results over São Paulo. *Atmospheric Environment*, v. 268, p. 118760.
- Thaker, J., Höller, R., 2023. Evaluation of High Resolution WRF Solar, *Energies*, v. 16, n. 8, p. 3518.

Yamaguchi, T., Alan Brewer, W., Feingold, G., 2013. Evaluation of modeled stratocumulus-capped boundary layer turbulence with shipborne data, *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 70, n. 12, p. 3895–3919.

SHORT-TERM FORECASTS OF GLOBAL HORIZONTAL IRRADIANCE IN THE BRAZILIAN SEMI-ARID UNDER DIFFERENT CLOUDINESS CONDITIONS USING WRF-SOLAR MODEL

Abstract. The present study aimed to evaluate the predictions of horizontal global irradiance (GHI) up to 48 hours ahead from the WRF-Solar model at the Solar Energy Reference Center of Eletrobras Chesf, located in the municipality of Petrolina (PE), known as CRESF. The evaluation covered the period from July 2020 to October 2020, representing months of lower and higher solar radiation incidence in the region, respectively. The study focused on the development and implementation of methodologies for solar radiation forecasting using the WRF models in their control (WRF-CTL) and solar (WRF-Solar) versions, with a specific focus on the Petrolina-PE region. Both versions of WRF were compared using metrics such as BIAS, RMSE, and the correlation coefficient R. WRF-Solar demonstrated superior accuracy in predictions, particularly in representing cloudy and clear-sky conditions with higher accuracy, despite having a slightly lower R coefficient than WRF-CTL. The hybrid cloud parameterization and treatment of shallow clouds in WRF-Solar may have been crucial for its better performance. However, both models faced challenges in representing the diurnal cycle of GHI, with significant difficulties in the morning hours attributed to the numerical complexity of cloud determination. The results, consistent with existing literature, provide a robust validation of the applicability of WRF-Solar for short-term forecasts under specific climatic conditions. However, it is crucial to note that this validation applies to the specific context of the studied region, emphasizing the need for further research and validation under various climatic and geographical conditions to enhance the model's effectiveness and applicability. Additionally, the research suggests that bias correction and additional model calibration are promising areas for future investigations. These measures can significantly contribute to mitigating systematic errors and improving the accuracy of predictions in subsequent studies.

Keywords: *Global solar irradiation, WRF model, Solar forecasting.*