

Impacto das Mudanças Climáticas na Geração de Energia Solar: Uma Análise Multimodelo Utilizando CMIP6

Francisco José Lopes de Lima – franciso.lopes@inpe.br

André Rodrigues Gonçalves

Rodrigo Santos Costa

Enio Bueno Pereira

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Fernando Ramos Martins

Universidade Federal do Estado de São Paulo

Resumo. A segurança energética vem se tornando mais dependente do clima na medida em que cresce a penetração de fontes renováveis na matriz energética mundial, tornando este tópico recorrente na agenda científica internacional. No Brasil, devido à diversidade de fontes energéticas de elevado potencial e sua grande extensão territorial, esta tendência tem-se confirmado especialmente com a expansão dos parques eólico e solar. Quantificar o risco futuro sobre o setor energético passa por compreender melhor as relações entre as projeções climáticas e a disponibilidade do recurso energético renovável em nosso território. Desta forma, este trabalho visa desenvolver ferramentas que permitam uma avaliação do risco futuro sobre o setor de geração de energia solar no Brasil, a partir de projeções climáticas. Aqui são apresentadas as correções estatísticas realizadas nos dados de reanálises atmosféricas que apresentaram melhor desempenho quando na comparação com outros dados utilizados como referência. Foram selecionados mais 40 modelos do CMIP6, sendo estes corrigidos em seus períodos históricos e avaliados, a fim de definir os melhores para a análises dos impactos futuros. Os resultados indicam um aumento na radiação solar em todo o Brasil, variando sazonalmente, com um incremento de até 6% na primavera e 3% em março-abril até o final do século, mesmo sob um cenário de altas emissões de CO₂ (SSP5-8.5). O estudo revela também variações regionais, com um destaque para uma área que poderia experimentar uma diminuição da irradiação solar em determinados meses. Além disso, foi observada uma correlação entre o aumento da radiação solar e a redução na precipitação, o que ressalta a complexidade e a importância de considerar múltiplos aspectos do sistema climático. Estas projeções são cruciais para o planejamento energético do Brasil, que possui alto potencial para expansão da energia solar. A compreensão das variações na disponibilidade de radiação solar influencia tanto a infraestrutura de energia renovável quanto às políticas de mitigação e adaptação às mudanças climáticas.

Palavras-chave: Energia Solar, Mudanças Climáticas, Modelagem Climática

1. INTRODUÇÃO

O Plano Decenal de Expansão de Energia (EPE, 2023) projeta uma participação das fontes renováveis (excluindo fontes hídricas) de até 35% na matriz energética para a próxima década. O Brasil possui um grande potencial de geração de energia solar e eólica devido à disponibilidade do recurso em grande parte do território nacional. O aumento da tarifa da energia elétrica devido à crise hídrica abriu espaço para uma discussão pautada na segurança energética, o que remete a inserção de outras fontes renováveis, além dos já discutidos cenários associados à diminuição do uso de combustíveis fósseis em função da emissão de carbono. Nesse contexto, a participação das gerações solar e eólica aumentou significativamente nos últimos anos, graças a investimentos do setor privado. Além disso, o preço da tecnologia fotovoltaica vem experimentando uma redução, enquanto a eficiência dos mesmos aumenta (EPE, 2023), tornando o cenário ainda mais atraente para a geração de energia solar no país.

Com o crescimento da participação das fontes eólica e solar, faz-se necessário conhecer melhor o seu comportamento no que se refere às disponibilidades temporal e espacial, se o seu comportamento continuará condizente com o histórico ou se haverá alguma alteração do seu potencial, proveniente das mudanças climáticas. A variabilidade climática possui influência bastante evidente no setor energético, à medida que a segurança energética vem tornando-se mais dependente do clima devido a penetração de fontes renováveis na matriz energética. Quantificar o risco futuro sobre o setor energético passa por compreender melhor as relações entre as projeções climáticas e a disponibilidade do recurso sobre nosso território, conforme discutido em diversos trabalhos (Martins; Guarnieri; Pereira, 2008; Viana *et al.*, 2011).

O CMIP (*Coupled Model Intercomparison Project*) é um projeto do *World Climate Research Programme* (WCRP), que desde 1995 coordena experimentos de modelos climáticos envolvendo múltiplas instituições em todo o mundo. O objetivo central do CMIP é avançar na compreensão científica do sistema terrestre e suas simulações são avaliadas regularmente como parte do IPCC. O último experimento (CMIP6) disponibilizou dezenas de projeções de clima futuro produzidas por diferentes modelos climáticos (<https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip/wgcm-cmip6>) os quais são utilizados neste estudo. A vantagem em utilizar-se diferentes simulações é poder avaliar a variabilidade entre modelos com diferentes sensibilidades climáticas e assim, conhecer e interpretar todos os possíveis cenários, levando-se

em conta a dispersão entre as suas saídas. Além disso, os caminhos de emissão de CO₂ que levarão às mudanças climáticas são incertos, por este motivo, diferentes cenários representativos de concentração de CO₂ são utilizados para expandir a análise.

O objetivo deste trabalho é fornecer as informações necessárias para compreender os impactos do clima sobre os recursos das fontes renováveis de energia, fazendo uma avaliação e análise do período histórico e projeções climáticas dos modelos do CMIP6 para radiação solar. Ainda que os modelos climáticos apresentem um progresso considerável na representação da circulação atmosférica, todos eles são afetados por vieses em um nível que prejudica o seu uso direto, especialmente em estudos de mudanças climáticas (Ehret *et al.*, 2012). A aferição do desempenho dos modelos climáticos é realizada através da comparação com bases observacionais, como estações de superfície ou conjuntos de reanálises (Rivera & Arnould, 2020). Desse modo, o estudo também envolveu a geração de uma base climatológica de irradiação solar utilizada como referência para a avaliação do desempenho dos modelos do CMIP6 e compreensão das incertezas envolvidas na avaliação dos cenários futuros de disponibilidade do recurso solar.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A investigação utilizou dados de radiação solar na superfície (SSR) disponíveis em três repositórios de dados: o *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* (CMIP6), reanálise ERA5 fornecida pelo ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) e o Atlas Brasileiro de Energia Solar (dados BSR).

O CMIP6 fornece dados SSR dos modelos climáticos globais usados pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) para um período histórico (1980-2014) e para o futuro em três intervalos de tempo: 2015-2040, 2041-2070 e 2071-2100. Antes de usar os dados do CMIP6 para investigar o impacto de cenários climáticos futuros, é crucial avaliar o quão representativas suas estimativas de SSR são dos padrões observacionais, comparando-os com um banco de dados de referência para o período histórico. Vários estudos demonstraram que os dados do ERA5 cumprem algumas características necessárias (cobertura temporal longa e contínua, resolução temporal horária e assimilação confiável de dados terrestres) para uso como a base de dados de referência (Avila-Diaz *et al.*, 2020; Firpo *et al.*, 2022). Produtos baseados em satélite também são uma alternativa considerando os desvios reduzidos em relação aos valores observados em superfície, no entanto, apresentam a desvantagem de não terem séries longas, como conjuntos de reanálise (Urraca *et al.*, 2018). Estudos anteriores mostram que as séries temporais do Atlas Brasileiro de Energia Solar (BSR) apresentam um viés baixo em todo o território brasileiro (Pereira *et al.*, 2017). No entanto, sua cobertura temporal é mais curta do que o necessário para servir como dados de referência na avaliação dos modelos do CMIP6. Para atender à cobertura temporal e à confiabilidade exigidas para os dados de referência na avaliação do desempenho dos modelos do CMIP6, aplicamos um método de correção de viés no banco de dados do ERA5, assumindo o BSR como referência.

2.1 Área de Estudo

A área de estudo abrange o território continental brasileiro, com uma área total de cerca de 8,5 milhões de km². O Brasil ocupa uma grande extensão na costa leste da América do Sul e engloba diversos biomas importantes, incluindo a Floresta Amazônica na região Noroeste, o Pantanal na região Centro-Oeste, a Caatinga na região Nordeste (região semiárida) e o Pampa no Sul do Brasil. A maior parte da população vive perto da costa do Atlântico, e as maiores cidades estão na região Sudeste. Essa grande dimensão geográfica e ambientes diversos compreendem uma ampla variedade de padrões climáticos. De acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger (Beck *et al.*, 2020), o Brasil possui um clima tropical no Norte, centro e área costeira Nordeste, apresentando padrões sazonais específicos em relação aos períodos secos e úmidos. O clima subtropical ocorre no Sul do Brasil e na área de topografia mais complexa do Sudeste brasileiro, apresentando diferenças nos padrões de temperatura e umidade (Alvares *et al.*, 2013).

O Brasil possui uma matriz energética diversificada que inclui fontes renováveis e não renováveis. A geração de energia fotovoltaica solar tem crescido rapidamente desde 2017, alcançando uma participação de 4,4% (EPE, 2023). Atualmente, a geração fotovoltaica representa 9,5 GW em usinas de grande porte e mais de 21 GW em geração distribuída. O Plano Decenal de Energia (PDE) prevê uma expansão da geração centralizada de energia eólica e solar de cerca de 10 GW até 2032 e um crescimento de cerca de 25 GW na geração de energia distribuída, alcançando cerca de 37 GW em 2032 (MME/EPE, 2023).

2.2 Material

2.2.1 Base de dados satelitais (BSR)

Esta base de dados foi produzida com uso do modelo BRASIL-SR que combina a aproximação de dois fluxos para a solução da equação de transferência radiativa na atmosfera com uso de dados de cobertura de nuvens obtidos em imagens do satélite *GOES-East* (Casagrande *et al.*, 2021). As estimativas produzidas pelo Modelo BRASIL-SR foram utilizadas em diversos estudos no Brasil, incluindo o Atlas Brasileiro de Energia Solar (Pereira *et al.*, 2017). A validação da irradiação solar global diária indicou que os desvios mensais na faixa de +/- 4.5% para 80% dos pontos avaliados no território brasileiro (Pereira *et al.*, 2017). Para este estudo, utilizamos médias diárias de irradiação solar

global (GHI) da base de dados gerada pelo modelo BSR para o período de 2005 a 2017 em resolução espacial de $0,04^\circ \times 0,05^\circ$ para o território brasileiro.

2.2.2 ERA5

A quinta geração de conjunto de reanálises do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), o ERA5 foi produzido utilizando o esquema de assimilação de dados 4D-Var no CY41R2 do modelo ECMWF *Integrated Forecast System* (IFS). A resolução espacial do ERA5 é $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ ($\sim 28 \text{ km} \times 28 \text{ km}$) e os dados são discretizados em resolução horária e disponibilizados em uma plataforma amigável na página do projeto *Copernicus Climate Change Service Data Store* – CDS (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/>) (Hersbach *et al.*, 2023). Os downloads de recortes geográficos e de longos conjuntos de dados são realizados pela *Application Program Interface* (API) em script Python. Foram utilizados dados do período compreendido entre 1980 e 2017 (37 anos) para o domínio Brasil para a variável *downward surface solar irradiation* (ssrd) referente ao acumulado de energia no período de uma hora (J/m^2).

2.2.3. CMIP6

A base de dados do CMIP6 abrange resultados das simulações para o período histórico (período baseline) e cenários futuros que combinam trajetórias de desenvolvimento socioeconômico e tecnológico denominados *Shared Socioeconomic Pathways* (SSP), com projeções futuros das forçantes radiativas (RCP, *Representative Concentration Pathways*) baseados em dados atualizados sobre tendências de emissões, em uma arquitetura de matriz de cenário (Eyring *et al.*, 2016; O'Neill *et al.*, 2016). Este estudo utilizou quarenta Modelos Climáticos Globais (GCM - *General Circulation Model*) do CMIP6 (<https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/>) para radiação solar (Eyring *et al.*, 2016), mostrado na Tab. 1 com sua respectiva resolução espacial. O critério de escolha para esta primeira seleção foi a disponibilidade de dados médios mensais de radiação solar que possuíssem projeções para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5.

Tabela 1 - Modelos CMIP6 utilizados no estudo e suas respectivas resoluções espaciais (radiação solar) (ordenadas em ordem alfabética).

ACCESS-CM2 [250 km]	M01	ACCESS-ESM1-5 [250 km]	M02	AWI-CM-1-1-MR [100 km]	M03
BCC-CSM2-MR [100 km]	M04	CAMS-CSM1-0 [100 km]	M05	CAS-ESM2-0 [100 km]	M06
CESM2-WACCM [100 km]	M07	CIESM [100 km]	M08	CMCC-CM2-SR5 [100 km]	M09
CMCC-ESM2 [100 km]	M10	CNRM-CM6-1-HR [50 km]	M11	CNRM-CM6-1 [250 km]	M12
CNRM-ESM2-1 [250 km]	M13	EC-Earth3-CC [100 km]	M14	EC-Earth3-Veg-LR [250 km]	M15
EC-Earth3-Veg [100 km]	M16	EC-Earth3 [100 km]	M17	FGOALS-f3-L [100 km]	M18
FGOALS-g3 [250 km]	M19	FIO-ESM-2-0 [100 km]	M20	GFDL-CM4 [100 km]	M21
GFDL-ESM4 [100 km]	M22	GISS-E2-1-G [250 km]	M23	GISS-E2-1-H [250 km]	M24
HadGEM3-GC31-LL [250 km]	M25	IITM-ESM [100 km]	M26	INM-CM4-8 [100 km]	M27
INM-CM5-0 [100 km]	M28	IPSL-CM6A-LR [250 km]	M29	KACE-1-0-G [250 km]	M30
KIOST-ESM [250 km]	M31	MIROC6 [250 km]	M32	MPI-ESM1-2-HR [100 km]	M33
MPI-ESM1-2-LR [100 km]	M34	MRI-ESM2-0 [100 km]	M35	NESM3 [250 km]	M36
NorESM2-LM [250 km]	M37	NorESM2-MM [100 km]	M38	TaiESM1 [100 km]	M39
UKESM1-0-LL [250 km]	M40				

Para este estudo, o cenário histórico e cenários de projeções SSP2-4.5 e SSP5-8.5 foram utilizados no período de 2015 até o final do século XXI. O SSP2 é denominado de cenário do “*middle of the road*”, com crescimento populacional moderado, convergência mais lenta dos níveis de renda entre os países. Enquanto no SSP5 espera-se um mundo com forte crescimento econômico baseado no uso de combustíveis fósseis e impactos potencialmente grandes das mudanças climáticas (Gidden *et al.*, 2019). Para todos os cenários foi utilizado o primeiro membro (*realization1*) de cada GCM.

2.3. Avaliação dos modelos do CMIP6

A avaliação de desempenho foi realizada para identificar os modelos do CMIP6 capazes de representar o regime de SSR, considerando tanto a variabilidade espacial quanto a sazonalidade intra-anual durante o período histórico. A Fig. 1 mostra as três áreas-alvo delimitadas para investigar a avaliação de desempenho dos modelos climáticos do CMIP6 nas regiões de grande interesse para o setor energético brasileiro:

Para a radiação solar global.

- Área A1(a) inclui a região semiárida do Nordeste brasileiro, onde o recurso de energia solar atinge a maior irradiação solar na superfície e a menor variabilidade sazonal (Pereira *et al.*, 2017);
- Área A2(a) compreende a região Sul do Brasil, onde o recurso de energia solar apresenta alta variabilidade sazonal, mas sistemas fotovoltaicos e turbinas eólicas podem integrar uma usina híbrida para aproveitar a alta velocidade do vento na região (Amarante *et al.*, 2001); e

- A Área A3(a) incorpora a região com alta irradiação solar na superfície e está próxima aos principais centros consumidores com boa cobertura do Sistema Interligado Nacional (SIN) de distribuição de eletricidade brasileiro.

Antes da avaliação de desempenho, todos os modelos do CMIP6 foram interpolados (abordagem bilinear) para a mesma resolução horizontal da grade do ERA5 (cerca de 27 km). O procedimento de interpolação foi essencial para uma comparação apropriada e imparcial dos resultados alcançados pelos modelos GCM na avaliação de desempenho. A avaliação de desempenho dos modelos foi realizada usando dados de 1980 a 2014, o período de interseção entre a disponibilidade de dados do ERA5 e CMIP6. Foram realizadas análises estatísticas temporais e espaciais, para as três áreas-alvo com base nos seguintes parâmetros:

- Correlação espacial (R_s): a correlação de Pearson calculada usando os dados de irradiação solar e velocidade do vento de cada ponto de grade do modelo climático e ERA5, nas áreas de interesse;
- Correlação temporal (R_t): o índice de correlação de Pearson obtido a partir das séries temporais dos modelos e do ERA5;
- RMSD: a raiz quadrada das médias dos desvios quadráticos entre as médias mensais dos modelos climáticos e ERA5;
- Razão de desvio padrão (SD): a razão média entre os desvios padrão dos modelos climáticos e ERA5 em todas as três áreas-alvo.

A correlação espacial R_s permitiu avaliar e comparar o desempenho dos modelos do CMIP6 em representar os padrões de variabilidade espacial nas três áreas-alvo. As etapas seguintes da avaliação de desempenho utilizaram o conjunto de modelos do CMIP6 com uma correlação espacial significativa (valor de $p < 0,05$) para os doze meses nas três áreas-alvo. As outras três métricas de avaliação foram usadas para construir o diagrama de Taylor, que resume quão bem os dados dos modelos do CMIP6 correspondem à climatologia do ERA5 em termos de correlação, desvio padrão e variâncias. Com base na abordagem de Taylor (2001), usamos o Fator de Habilidade de Taylor (TS) na Eq. (1) para identificar os modelos do CMIP6 mais representativos da climatologia da radiação solar e velocidade do vento, preservando informações importantes sobre a variabilidade nas previsões do CMIP6. Essa abordagem nos permitiu avaliar a incerteza do impacto em cenários futuros.

$$TS = \frac{4(1+R_t)^4}{(f\sigma_{Mx} + 1f\sigma_{Mx})^2(1+R_{t0})^4} \quad (1)$$

Onde R_t é o coeficiente entre os modelos do CMIP6 e o ERA5, $f\sigma_{Mx}$ é a razão entre a variância do modelo do CMIP6 (Mx) e a variância do ERA5 e R_{t0} é a correlação máxima atingível. Os modelos do CMIP6 que alcançaram um TS maior que 0,9 foram combinados para formar um conjunto de modelos chamado *Smart Ensemble* (SME), usado na avaliação do impacto de cenários climáticos futuros no recurso de energia solar e eólica. Além do conjunto de modelos SME, foi calculado um conjunto de modelos multi-modelo (referido como ENS a partir de agora) pela média dos dados de radiação solar global fornecidos por cada um dos modelos do CMIP6 descritos na Tab. 1. O desempenho do SME e do ENS também foi investigado com base nos mesmos parâmetros estatísticos aplicados aos modelos individuais Mx .

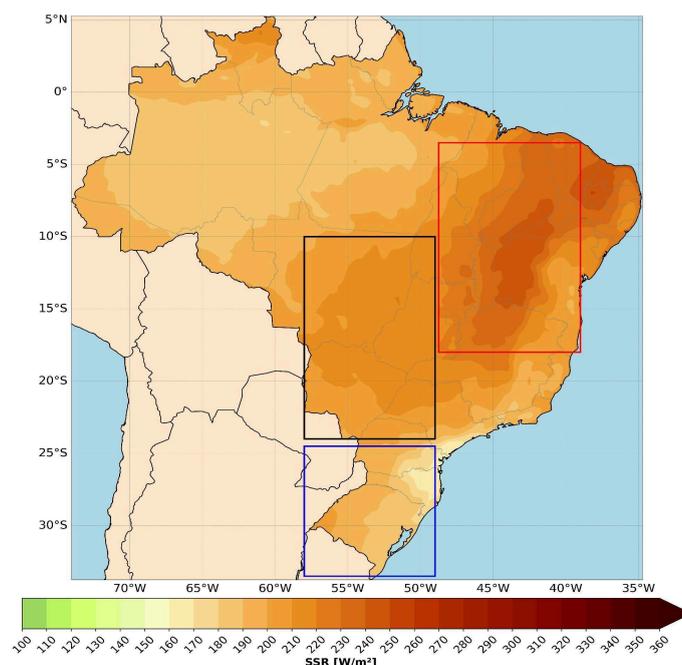


Figura 1 - Mapas da média mensal de irradiação solar global determinada a partir da combinação das bases de dados do ERA5 e BSR.

2.4. Avaliação dos impactos

A abordagem do "fator de mudança" proposta por Navarro-Racines & Tarapues Montenegro *et al.* (2015) foi adotada para avaliar os impactos das trajetórias climáticas futuras SSP2-4.5 e SSP5-8.5. O fator de mudança representa a mudança percentual na irradiação solar nos cenários futuros em relação à previsão do modelo para o período histórico (1980-2014). As Eq. (2) e Eq. (3) foram utilizadas para estimar, respectivamente, o fator de mudança (CF) e a SSR futura em cada intervalo de tempo assumindo a base de dados do ERA5 para a climatologia atual de SSR. Portanto, o fator de mudança (CF) é calculado para cada modelo ou conjunto do CMIP6 em cada intervalo de tempo do cenário climático futuro (*timeslice*), levando em consideração a localização geográfica e o mês específico.

$$CF(t, SSP)_{Mx, timeslice} = \frac{SSR_{Mx}(t, SSP)_{timeslice} - SSR_{Mx}(t, SSP)_{historical}}{SSR_{Mx}(t, SSP)_{historical}} \quad (2)$$

$$SSR(t, SSP)_{timeslice} = SSR_{ERA.QM}(t) + CF(t, SSP)_{Mx, timeslice} \cdot SSR_{Mx}(t, SSP) \quad (3)$$

onde o Mx representa um modelo ou conjunto específico do CMIP6, e o *timeslice* se refere ao cenário climático futuro em avaliação. O SSP é uma das trajetórias futuras para as mudanças climáticas (SSP2-4.5 ou SSP5-8.5).

3. RESULTADOS

A avaliação de desempenho dos modelos do CMIP6 foi realizada para o período de 1980 a 2014, comparando suas médias mensais de SSR com o conjunto de dados de referência (ERA5+BSR) para o período de baseline (1980-2014). A Fig. 2 é um painel que apresenta o mapa da irradiação solar da base de dados de referência e a distribuição espacial dos desvios apresentados pelas estimativas de cada um dos quarenta modelos CMIP6 utilizados no estudo. Observa-se que os modelos climáticos, em geral, superestimam a irradiação solar no norte do Brasil, principalmente na região da Amazônia. Pode-se verificar uma certa concordância com os dados observados no Nordeste e Sul do Brasil e uma superestimativa significativa no Norte, região de maior nebulosidade do Brasil. O desvio de viés do *ensemble* de 40 modelos (referido como ENS) também é apresentado na Fig. 2. O ENS reproduz o padrão espacial de irradiação solar sobre regiões com maior disponibilidade de recursos de energia solar no território brasileiro, destacando o viés reduzido sobre a área A1 e a superestimação baixa (em torno de 50 W/m²) na região Amazônica. Esses resultados estão consistentes com estudo de Firpo *et al.* (2022) que mostra um viés negativo para os valores de precipitação fornecidos pelos modelos do CMIP6 sobre a região Amazônica.

O painel da Fig. 2 fornece uma visão abrangente da diversidade de dados de climatologia de SSR produzidos pelos modelos do CMIP6, incluindo a alternância de sinais para as mesmas regiões geográficas. Em relação à área-alvo A1, por exemplo, o modelo ACCESS-ESM1-5 (M2) superestima o SSR em cerca de 40-50 W/m², enquanto os modelos M5, M19, M25 e M36 subestimam em cerca de 40-50 W/m². A maioria dos modelos superestima em torno de 30 W/m² na área A2, enquanto CAMS (M4), CAS-ESM (M5) e KIOS-T (M33) subestimam em até 20 W/m². Os desvios de viés na área A3 apresentam um padrão semelhante ao de A2. O painel evidencia a necessidade de identificar os modelos do CMIP6 que fornecem os dados de SSR mais representativos para o período histórico em relação à base de dados usada como referência.

O primeiro passo na avaliação da representatividade compreende a correlação espacial entre os modelos do CMIP6 e o (ERA5+BSR) nas três áreas de interesse, a fim de identificar aqueles que melhor reproduzem os padrões espaciais de SSR nas áreas-alvo. Os resultados da correlação espacial mensal nas três áreas-alvo indicaram os 22 modelos do CMIP6 e o ENS que apresentam correlação positiva significativa ($p < 0,05$) com a base de dados de referência nas três áreas-alvo. O ENS apresentou o melhor índice de correlação nas três áreas, destacando o benefício de trabalhar com conjuntos de modelos. Os modelos que apresentaram correlação não significativa foram descartados para a continuidade do estudo porque apresentam um desempenho reduzido na reprodução dos padrões sazonais da variabilidade espacial da irradiação solar no território brasileiro. A maioria dos modelos descartados apresentou correlação não significativa nos meses de transição entre as estações chuvosa e seca (abril e outubro).

A Fig. 3 exibe o diagrama de Taylor que inclui o índice de correlação temporal (R), o desvio quadrático médio (RMSD) e a razão do desvio padrão (SD) alcançados pelos 22 modelos e pelo conjunto (ENS) em comparação com o base de dados ERA5+BSR. Os marcadores azuis denotam os modelos que apresentam um TS superior a 0,9. Dez modelos do CMIP6 (Mi) e o ENS com melhor correlação espacial e temporal, menores desvios e variabilidade mais próxima dos dados de referência atingiram o limite estabelecido de forma arbitrária para limitar os modelos climáticos a serem incluídos na formulação de um ensemble de modelos de melhor desempenho para o território brasileira no que tange a distribuição espacial e temporal da irradiação solar incidente na superfície.

Considerando o objetivo de avaliar como a mudança climática impacta a quantidade de energia solar que atinge a superfície da Terra, as estimativas produzidas pelos modelos climáticos devem ter uma dispersão reduzida e considerar adequadamente as variações sazonais e espaciais. O conjunto de modelos ENS apresenta a maior correlação espacial, mas possui um desempenho inferior em outras métricas estatísticas. Por exemplo, o modelo M25 (IITM-ESM) apresenta o maior valor para o Fator de Habilidade de Taylor, com a maior correlação temporal (R) e menor RMSD.

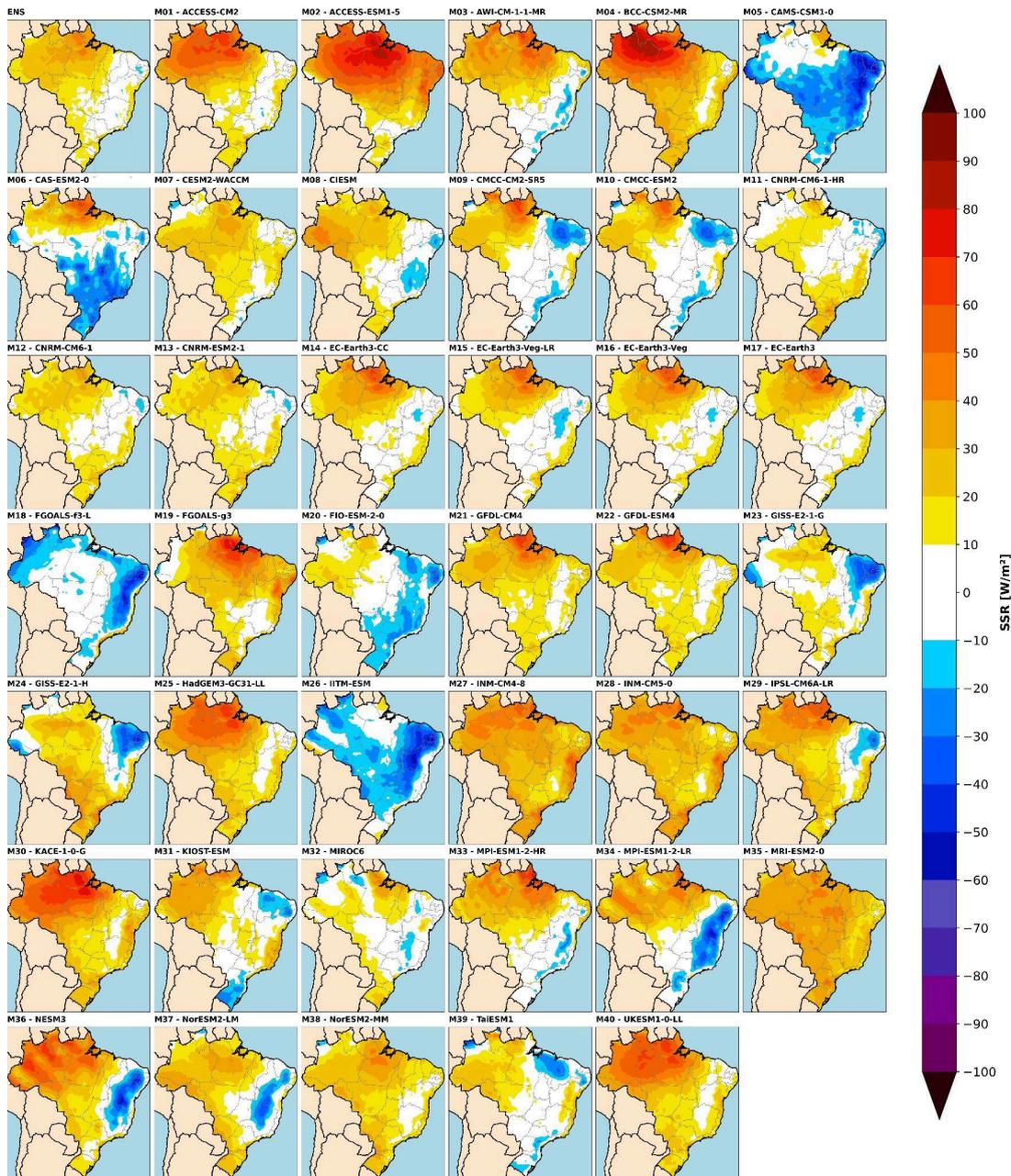


Figura 2 - Painele contendo o mapa de irradiância solar obtido com dados do ERA5 (linha superior esquerda) e o mapa de desvio de viés observados nas estimativas de SSR fornecida pelos modelos climáticos do CMIP6.

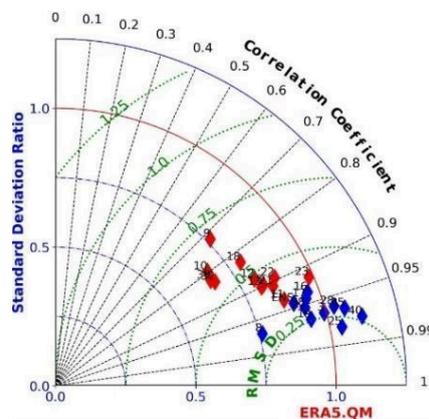


Figure 3. Diagrama de Taylor com resultados alcançados pelos modelos CMIP6 em comparação com os valores de referência. Os marcadores azuis representam os modelos CMIP6 com Fator de Habilidade de Taylor acima de 0,9.

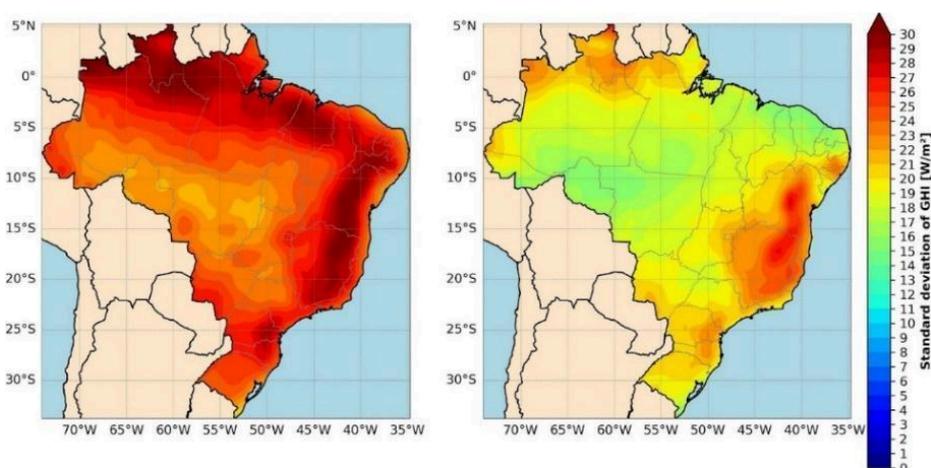


Figura 4 - Mapeamento do desvio-padrão observado para irradiância solar na superfície produzida pelo ENS (esquerda) e SmartENS (direita) para o período de baseline (1980-2014).

O conjunto *Smart Ensemble* (SME) foi preparado usando os dez modelos do CMIP6 identificados na análise do Taylor Skill Factor. O SME mostrou uma correlação espacial equivalente ao conjunto ENS usando os 40 modelos do CMIP6. No entanto, o SME apresentou um resultado superior na análise do Fator de Habilidade de Taylor (TS) devido à sua maior correlação temporal, menor desvio (RMSD) e menor variabilidade (razão de desvio padrão) em comparação com o ENS. A Fig. 4 demonstra que os desvios padrão dos valores de SSR obtidos com uso do SME (cerca de 15-27 W/m^2) são menores do que os valores de SD obtidos com uso de ENS (20-30 W/m^2) em todo o território brasileiro.

Para uma avaliação da influência dos cenários climáticos previstos nas projeções do CMIP6, utilizou-se as saídas dos dez modelos com maiores valores de TS para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5. As previsões do ensemble SME para ambos cenários foram determinadas. A determinação do fator de mudança da irradiância solar na superfície (CCF) foi realizada para *time-slices* que compreendem os períodos de 2015-2040 (futuro-próximo) e 2071-2100 (fim-do-século).

A Fig. 5 exibe mapas sazonais do CCF médio para o território brasileiro no futuro-próximo (2015-2040) e no fim-do-século (2070-2100). No verão do futuro-próximo, espera-se um aumento de até 3% no SSR em áreas da Amazônia e Centro do Brasil, incluindo o Sudeste do Brasil, próximo da maioria dos consumidores de eletricidade. No fim-do-século, a temporada de verão mostra uma clara diminuição de até -2% (-4%) no SSR na parte norte da região Nordeste sob SSP2-4.5 (SSP5-8.5). Por outro lado, espera-se um aumento de até 4% (6%) na região Amazônica, Centro e Sudeste do Brasil sob SSP2-4.5 (SSP5-8.5).

Para o outono no período do futuro próximo, o CCF positivo (cerca de 2%) está concentrado na Amazônia e no Nordeste do Brasil nas condições do SSP2-4.5. O mesmo padrão pode se estender para a região Sudeste no cenário SSP5-8.5. Olhando mais adiante para o período do fim-do-século, ocorre um padrão geográfico semelhante, com um CCF máximo de cerca de 6% em uma área central da Amazônia. No entanto, há uma projeção de diminuição na SSR para a região Sul, com o CCF atingindo -2% (-4%) nos cenários SSP2-4.5 (SSP5-8.5).

Para o inverno do período de 2015-2040, os mapas de CCF mostram um CCF positivo (até 3%) sobre a área semiárida do Nordeste e parte das regiões Sudeste do Brasil no SSP2-4.5. O padrão se estende sobre a região Central do Brasil no SSP5-8.5. O padrão geográfico também ocorre no período de 2071-2100, mas com valores de CCF mais altos, atingindo cerca de 5% em partes das regiões Sudeste e Amazônia. Assim como no outono, a SSR diminui no Sul do Brasil no período do fim do século em ambos os cenários climáticos, alcançando valores de CCF em torno de -3% (-5%) em SSP2-4.5 (SSP5-8.5).

Durante a primavera, o CCF positivo cobre uma vasta parte do Brasil, estendendo-se desde a Amazônia Ocidental até as áreas costeiras do Atlântico das regiões Nordeste e Sudeste. A região semiárida e a parte norte da região Sudeste apresentam os maiores valores de CCF, em torno de 4% (5%) no período de 2015-2040 e 6% (10%) no período do fim do século com base nos cenários SSP2-4.5 (SSP5-8.5). A região Sudeste abriga as maiores cidades brasileiras e a maior quantidade de sistemas de energia solar distribuída, coincidentemente onde é previsto o maior aumento na SSR.

Esses sinais positivos amplificados na SSR durante a primavera nas regiões semiárida e Central do Brasil (onde a maioria das usinas de energia solar em grande escala estão localizadas) desempenham um papel importante na vulnerabilidade do sistema elétrico brasileiro às mudanças climáticas. O Sistema Interligado Nacional (SIN) do Brasil ainda depende principalmente da energia hidrelétrica e enfrenta operações mais restritivas no final da estação chuvosa (setembro a novembro), quando os reservatórios geralmente estão expostos à variabilidade climática com ocorrência mais frequente de eventos extremos de seca prolongada como evidenciado recentemente (Hunt, Stippen & Freitas, 2018). Nesse sentido, os níveis mais altos de recursos solares durante a primavera adicionam resiliência à operação do sistema elétrico nacional no futuro para ambos os cenários. No entanto, espera-se um impacto das mudanças climáticas nos recursos de outras fontes renováveis (eólica, hidrelétrica) e estes devem ser avaliados em conjunto em trabalho futuro.

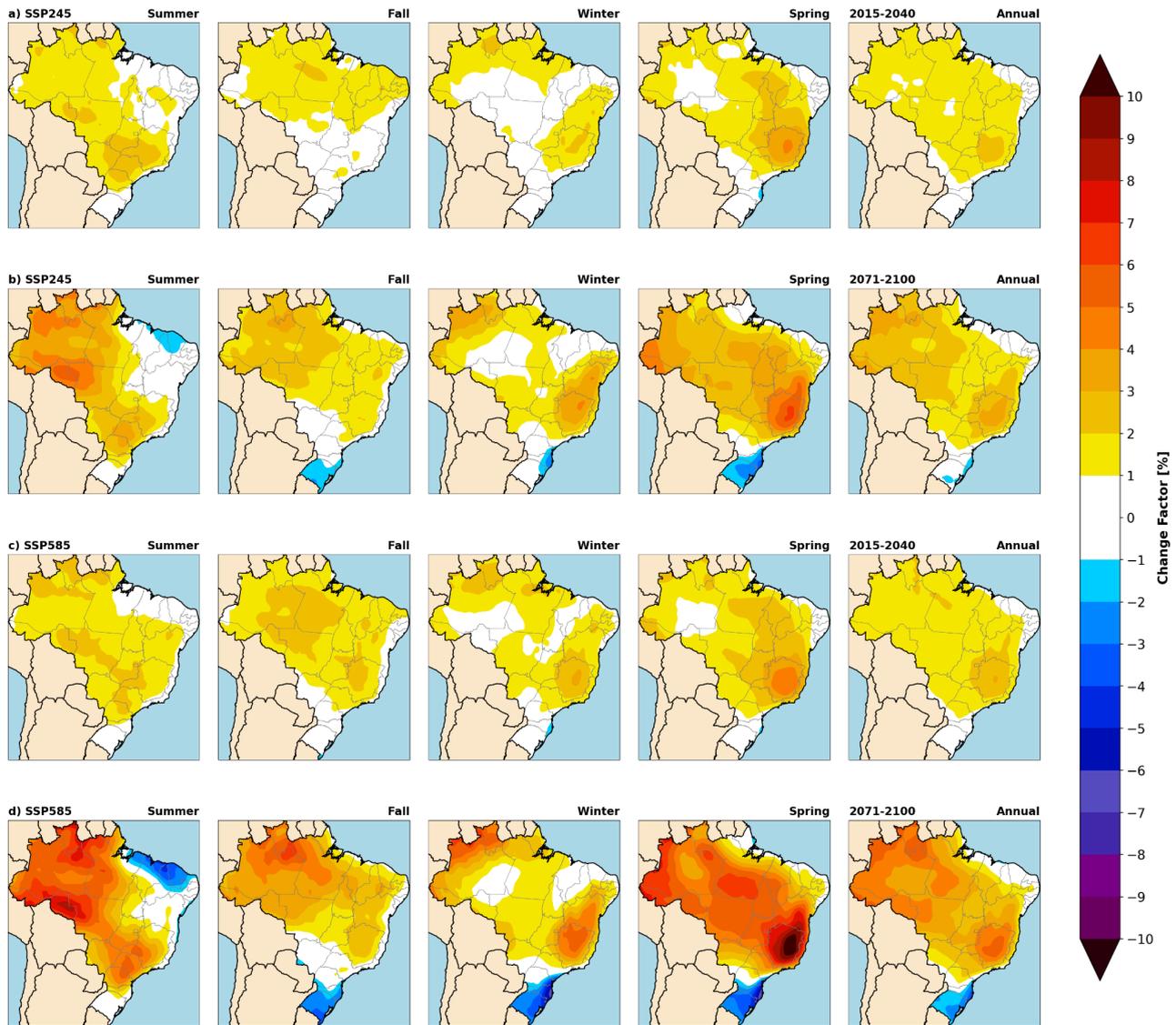


Figura 5 - O fator de mudança na SSR sazonal previsto pelo SME no SSP2-4.5 (primeiras duas linhas) e SSP5-8.5 (últimas duas linhas) para os períodos de 2015-2040 (linhas ímpares) e 2071-2100 (linhas pares). As estações do ano estão apresentadas sequencialmente da esquerda para a direita: verão, outono, inverno e primavera. A coluna mais à direita apresenta a média anual do CCF.

4. CONCLUSÕES

Este estudo buscou avaliar a influência da mudança climática na irradiância solar incidente na superfície considerando as previsões fornecidas por quarenta modelos climáticos presentes na base de dados do CMIP6. Inicialmente, dez modelos climáticos foram selecionados com base em uma análise de métricas estatísticas que buscam identificar a representatividade das estimativas em comparação com valores presentes em bases combinadas de dados de reanálise e de estimativas baseadas em imagens de satélite. A avaliação mostrou que modelos CMIP6 superestimam a radiação solar no norte do Brasil, especialmente na região da Amazônia, enquanto exibem certa concordância com os dados observados no Nordeste e Sul do Brasil. A comparação dos modelos com o conjunto de referência permitiu identificar aqueles que melhor reproduzem os padrões espaciais de irradiância solar em diferentes áreas-alvo. Através de projeções realizadas com base nos modelos do conjunto Smart Ensemble (SME), foram avaliadas as variações sazonais do fator de mudança climática (CCF) em diversas áreas do país. Os resultados mostram que a variação sazonal do CCF na irradiância solar incidente na superfície será diferente nas regiões do Brasil. Na região da Amazônia e Centro do Brasil, incluindo o Sudeste, é esperado um aumento no SSR, especialmente durante a primavera e outono. Esse aumento pode chegar a mais de 10 W/m^2 nas estações de outono e primavera nos cenários futuros, o que representa um acréscimo significativo no recurso solar nessas áreas. Por outro lado, na região Sul do Brasil e em áreas específicas do Nordeste, é projetada uma redução no SSR durante alguns meses do ano, principalmente entre abril e agosto. Essa redução pode chegar a $-4,5\%$ em alguns casos nos cenários mais extremos. Essas mudanças sazonais podem ter implicações na resiliência do sistema elétrico, especialmente no setor de energia solar distribuída.

A análise dos modelos climáticos do CMIP6 fornece *insights* importantes para o planejamento energético e o desenvolvimento sustentável do Brasil, considerando os possíveis impactos das mudanças climáticas na disponibilidade futura do potencial solar. No entanto, a investigação sobre o impacto das mudanças climáticas na energia eólica e em outras fontes renováveis é fundamental e será apresentada em trabalho futuro, a fim de obter uma visão abrangente da transição energética do país.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao financiamento recebido através dos projetos: “Avaliação do recurso fotovoltaico em reservatórios hidroelétricos com base em modelagem numérica e sensoriamento remoto” (CNPq 409711/2021-7), ao projeto INCT-Mudanças Climáticas Fase 2 (FAPESP 2014/50848-9, CNPq 465501/2014-1, CAPES/FAPS No 16/2014), e ao projeto FINEP “SOLTER - União por difusão de metais leves em acumuladores de energia solar compactos para a geração de eletricidade por fonte termossolar no Brasil” (FINEP 0018/21). Agradecem também ao financiamento recebido em bolsas de pesquisa nos processos CNPq 312929/2020-0, 310148/2020-0 e 300227/2024-8.

REFERÊNCIAS

- Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., de Moraes Gonçalves, J. L., & Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6), 711-728.
- Amarante, O. A. C., Brower, M., Zack, J., & Sá, A. L. (2001). *Atlas do Potencial Eólico Brasileiro*. Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, Ministério de Minas e Energia.
- Ávila-Díaz, A., Benezoli, V., Justino, F., Torres, R., Wilson, A. (2020). Assessing current and future trends of climate extremes across Brazil based on reanalyses and earth system model projections. *Climatic Dynamics*, 55, 1403–1426.
- Beck, H. E., Zimmermann, N. E., McVicar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A., Wood, E. F. (2020). Publisher Correction: Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data*, 7, Article 274
- Casagrande, M. S., Martins, F. R., Rosário, N. E., Lima, F. J., Gonçalves, A. R., Costa, R. S., Pereira, E. B. (2021). Numerical Assessment of Downward Incoming Solar Irradiance in Smoke Influenced Regions—A Case Study in Brazilian Amazon and Cerrado. *Remote Sensing*, 13(22), 4527
- Ehret, U., Zehe, E., Wulfmeyer, V., Warrach-Sagi, K., Liebert, J. (2012). Should we apply bias correction to global and regional climate model data? *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(9), 3391-3404.
- EPE - Empresa de Pesquisa Energética. (2023). Balanço Energético Nacional – Relatório Síntese 2023 (Ano base 2022). Brasília: Ministério de Minas e Energia.
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9, 1937–1958.
- Firpo, M. Â., Guimarães, B. D., Dantas, L. G., Silva, M. G., Alves, L. M., Chadwick, R., Llopart, M. P., & Oliveira, G. S. (2022). Assessment of CMIP6 models' performance in simulating present-day climate in Brazil. *Frontiers in Climate*, 4, 948499.
- Gidden, M. J., Riahi, K., Smith, S. J., Fujimori, S., Luderer, G., Kriegler, E., van Vuuren, D. P., van den Berg, M., Feng, L., Klein, D., Calvin, K., Doelman, J. C., Frank, S., Fricko, O., Harmsen, M., Hasegawa, T., Havlik, P., Hilaire, J., Hoesly, R., Horing, J., Popp, A., Stehfest, E., & Takahashi, K. (2019). Global emissions pathways under different socioeconomic scenarios for use in CMIP6: a dataset of harmonized emissions trajectories through the end of the century. *Geoscientific Model Development*, 12, 1443–1475
- Hunt, J. D., Stilpen, D., & Freitas, M. A. V. (2018). A review of the causes, impacts and solutions for electricity supply crises in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 88, 208-222.
- Martins, F. R., Guarnieri, R. A., & Pereira, E. B. (2008). O aproveitamento da energia eólica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*.
- MME/EPE (2023). Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Plano Decenal de Expansão de Energia 2032. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2032>
- Navarro-Racines, C. E., & Tarapues Montenegro, J. E. (2015). Bias-correction in the CCAFS-Climate Portal: A description of methodologies.
- O'Neill, B. C., Tebaldi, C., Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J. F., Lowe, J., Meehl, G. A., Moss, R., Riahi, K., Sanderson, B. M. (2016). The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9(9), 3461-3482.
- Pereira, E. B., Martins, F. R., Gonçalves, A. R., Costa, R. S., Lima, F. J. L., Rüther, R., Abreu, S. L., Tiepolo, G. M., Pereira, S. V., & Souza, J. (2017). *Brazilian Atlas for Solar Energy* (2nd ed.). São José dos Campos: Universidade Federal de São Paulo.

- Rivera, J. A., & Arnould, G. (2020). Evaluation of the ability of CMIP6 models to simulate precipitation over Southwestern South America: Climatic features and long-term trends (1901–2014). *Atmospheric Research*, 241, 104953.
- Taylor, K. E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *J. Geophysical Res.*, 106,D7, 7183-7192.
- Urraca, R., Huld, T., Gracia-Amillo, A., Martinez-de-Pison, F. J., Kaspar, F., & Sanz-Garcia, A. (2018). Evaluation of global horizontal irradiance estimates from ERA5 and COSMO-REA6 reanalyses using ground and satellite-based data. *Solar Energy*, 164, 339-354.
- Viana, T. S., Ruther, R., Martins, F. R., Pereira, E. B. (2011). Assessing the potential of concentrating solar photovoltaic generation in Brazil with satellite-derived direct normal irradiation. *Solar Energy*, 85(3), 486-495.

IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON SOLAR ENERGY GENERATION: A MULTI-MODEL ANALYSIS USING CMIP6

Abstract. Energy security is becoming increasingly climate-dependent as the penetration of renewable sources into the global energy matrix grows, making this topic a recurring one on the international scientific agenda. In Brazil, due to the diversity of high-potential energy sources and its vast territorial extent, this trend has been confirmed especially with the expansion of the wind and solar parks. Quantifying future risk to the energy sector involves better understanding the relationships between climate projections and the availability of renewable energy resources in our territory. Thus, this work aims to develop tools that allow an assessment of the future risk to the solar energy generation sector in Brazil, based on climate projections. Here, the statistical corrections performed on the atmospheric reanalysis data that performed best when compared to other data used as reference are presented. More than 40 CMIP6 models were selected, being corrected in their historical periods and evaluated in order to define the best for future impact analysis. The results indicate an increase in solar radiation throughout Brazil, varying seasonally, with an increase of up to 6% in spring and 3% in March-April by the end of the century, even under a high CO₂ emissions scenario (SSP5-8.5). The study also reveals regional variations, with a highlight for an area that could experience a decrease in solar irradiation in certain months. In addition, a correlation was observed between the increase in solar radiation and the reduction in precipitation, highlighting the complexity and importance of considering multiple aspects of the climate system. These projections are crucial for Brazil's energy planning, which has a high potential for the expansion of solar energy. Understanding variations in the availability of solar radiation will influence both renewable energy infrastructure and climate change mitigation and adaptation policies.

Keywords: Solar Energy, Climate Change, Climate Modeling