

IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA DISPONIBILIDADE DO RECURSO ENERGÉTICO SOLAR

Rodrigo Santos Costa¹
Graziela Luzia da Costa²
Francisco José Lopes de Lima¹
André Rodrigues Gonçalves¹
Fernando Ramos Martins³
Enio Bueno Pereira¹
Madeleine Sánchez Gácita Casagrande³

¹*Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais*

²*Technical University of Denmark*

³*Universidade Federal do Estado de São Paulo*

DOI: 10.47168/rbe.v26i4.579

Recebido em: 12.07.2020

Aceito em: 18.08.2020

RESUMO

O Brasil possui um grande potencial de geração de energia solar devido aos elevados níveis de irradiação na maior parte do seu território. O crescimento esperado da participação da fonte solar na matriz energética demanda um maior entendimento de qual será sua variabilidade temporal e espacial, em especial em relação à disponibilidade atual e de possíveis impactos das mudanças do clima. Neste sentido, este estudo tem por objetivo avaliar o impacto das mudanças climáticas sobre o recurso solar brasileiro, estimando alterações tanto na disponibilidade média quanto no perfil sazonal do recurso. Foram produzidos dados climatológicos de totais diários de irradiação global horizontal, que serviram como referência na remoção do viés dos resultados de modelos climáticos. Esta remoção foi realizada através de técnicas estatísticas, considerando uma avaliação do seu erro no período histórico e partindo da premissa que os processos radiativos não sofrem alterações nas condições de cenários futuros de clima e, portanto, os desvios das estimativas produzidas pelos modelos não se alteram significativamente. As análises foram realizadas a partir das simulações para os cenários RCP's 4.5 (intermediário) e 8.5 (pessimista), divididas em três horizontes temporais - 2006-2040, 2040-2070 e 2070-2099. Os resultados indicaram padrões espaciais da variação do recurso solar. Estes resultados são bastante relevantes pois afetam regiões hoje exploradas para a geração solar e indicam a necessidade de se buscar ações focadas no comportamento futuro dos recursos, subsidiando políticas de planejamento que já estão em

andamento. Além disso, reforçam a contribuição desses estudos para o planejamento da expansão do setor, em especial vislumbrando estratégias de adaptação do parque gerador durante a transição para fontes de energia mais dependentes do clima.

Palavras-chave: Mudanças climáticas, Recurso solar, Planejamento energético.

ABSTRACT

Brazil has a huge potential for solar energy generation due to tropical irradiation levels. The expected growth of solar energy in the energy matrix requires a greater understanding of temporal and spatial variability, especially concerned to the current availability and possible impacts of climate change. In this way, this study aims to understand the impact of climate change on the Brazilian solar resource, estimating changes in availability and seasonal behaviors. Daily totals of global horizontal irradiation based on climatological data were produced, which was a reference to remove bias in climate models. This removal was carried out using statistical techniques, considering a bias evaluation in the historical period and assuming that the radiative processes does not change in the future climate scenarios. The evaluations were performed from scenarios RCP's 4.5 (intermediate) and 8.5 (pessimistic), divided into three time horizons - 2006-2040, 2040-2070 and 2070-2099. The results indicated spatial patterns of the variation of the solar resource. These results are quite relevant because they affect regions currently used for solar generation and indicate required actions focused on the future of the resources, subsidizing planning policies that are already underway. In addition, they reinforce the contribution of these studies to the planning of the electric sector, in particular by envisioning strategies to adapt the electricity generation capacity to more climate dependent energy resources.

Keywords: Climate change, Solar energy resource, Energy planning.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil possui um grande potencial de geração de energia solar devido a elevados níveis de irradiação na maior parte do território nacional. As questões relacionadas à segurança energética são afetadas pelo rápido crescimento da participação da fonte solar nos últimos anos, e trazem à tona uma discussão relevante em termos de Planejamento Energético, em especial no médio e no longo prazo, sobre qual será o impacto das Mudanças Climáticas na disponibilidade deste recurso no futuro. Segundo o Plano Decenal de Expansão da Energia (MME/EPE, 2019), espera-se que em 2029 a fonte solar represente

8% de um total instalado de 251 GW. Esse crescimento requer o entendimento de qual será sua variabilidade temporal e espacial, em especial em relação à disponibilidade atual. Neste sentido, este estudo tem por objetivo avaliar o impacto das mudanças climáticas sobre o recurso solar brasileiro, estimando alterações tanto na disponibilidade média quanto no perfil sazonal do recurso.

São poucos os estudos que analisam os impactos futuros na disponibilidade do recurso solar no Brasil. Entretanto, é possível encontrar trabalhos analisando impactos globais ou para a América do Sul, a exemplo de Crook et al. (2011). Utilizando os modelos climáticos globais HadGEM1 e HadCM3 para examinar como as mudanças na temperatura e insolação projetadas para o século XXI no cenário SRES A1B (que considera um futuro de rápido crescimento econômico e utilização combinada de combustíveis fósseis e de origem em fontes renováveis) irão impactar a geração de energia solar concentrada e fotovoltaica. Os resultados globais mostram uma redução entre 6 e 10% para a maior parte do Brasil (exceto na região Amazônica, onde prevê um aumento entre 2 a 4%) na geração de energia fotovoltaica. Para energia solar concentrada, o trabalho apresenta redução (até 5%) sobre o nordeste e sul do Brasil, e aumento (de 5 a 10%) para a maioria das demais regiões do país.

Huber et al. (2016) analisaram o impacto das mudanças climáticas na irradiação solar em diversos locais do planeta, bem como o impacto na geração de energia solar concentrada (CSP) e fotovoltaica (PV). Comparando um período futuro (2035-2039) com um período recente (1995-1999), para duas regiões analisadas sobre a América do Sul, o estudo concluiu que, para a parte norte do continente (incluindo norte e nordeste do Brasil), é projetada uma redução de $-13,73 \text{ W/m}^2$ (-2%) na *global horizontal irradiation* (GHI) e de $-27,19 \text{ W/m}^2$ (-8%) na *diffuse horizontal irradiation* (DHI), ambos ao meio dia local. Para a parte sul da América do Sul (incluindo todo o restante do Brasil), é projetado um aumento de $+2,62 \text{ W/m}^2$ (menos de 1%) na GHI e uma redução de $-15,21 \text{ W/m}^2$ (-3%) na DHI. Com relação ao número de dias adequados para a operação de CSP, apresentaram variação para as partes norte e sul, respectivamente, de +1,8% e -1,5%. Nenhum dos valores, entretanto, com significância estatística. Os autores chamam a atenção para as limitações do estudo, que utilizou dados em baixa resolução espacial (maior do que 300 km) e pelo fato de não ter considerado as variabilidades climáticas interanuais ao assumir o período de cinco anos como representativo para o cálculo das diferenças.

Particularmente sobre o Brasil, Jong et al. (2019), utilizaram dados de *downscaling* de três modelos climáticos (Eta-HadGEM2-ES, Eta-CanESM2 e Eta-MIROC5) para investigar os impactos das mudanças climáticas sobre os recursos energéticos solar e eólico para

os anos de 2030 e 2080, sob o cenário de altas emissões (RCP8.5). Os autores projetaram aumento no potencial de energia solar para a maioria das regiões do Brasil, chegando a 3,6% sobre o Nordeste. Houve um consenso entre modelos de que a radiação solar poderia aumentar em todos os parques solares das regiões analisadas, sobre o Nordeste e parte do Sudeste, com destaque para Pirapora (Minas Gerais) que apresentou aumento de até 11,6% de acordo com o modelo Eta-CanESM2. Por outro lado, o modelo Eta-MIROC5 projetou uma redução de 3,8% no recurso solar sobre as instalações de Guaimbe (São Paulo), enquanto os outros dois modelos projetam um ligeiro aumento sobre a mesma localidade. Os autores afirmam, porém, a necessidade de uma maior investigação dos resultados obtidos, através de *ensemble* entre os dados das projeções regionais e da remoção de erros sistemáticos através da utilização de dados observados a 100 m acima do nível do solo.

2. METODOLOGIA

2.1 Base de dados observados

A base de dados observados utilizada neste trabalho foi obtida a partir do uso da técnica de *downscaling* estatístico empírico com o método de mapa de quantis. Diversos autores apontam o método como sendo um dos que têm melhor desempenho para esse tipo de *downscaling* (Gudmundsson et al., 2012; Teutschbein e Seibert, 2012; Rätty, Räisänen e Ylhäisi, 2014, dentre outros), no qual erros na distribuição da simulação são corrigidos pelos da observação, trasladando quantis de acordo com funções de transferência obtidos para cada ponto e em cada período de referência (Boé et al., 2007). Uma série de 27 anos de dados mensais de reanálise do ERA5 (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts - ECMWF Re-Analysis*) foi corrigida utilizando-se como dado observado a série diária da segunda edição do Atlas Brasileiro de Energia Solar (Pereira et al, 2017), com 17 anos de dados incluindo informações de satélite e estimativas do modelo BRASIL-SR.

2.2 Correção de viés

Apesar de atualmente os modelos apresentarem um progresso considerável na representação da circulação atmosférica, tanto global quanto regional, todos eles são afetados com algum viés em um grau que inviabiliza seu uso direto, sem um ajuste, especialmente em estudos de mudanças climáticas (Ehret et al., 2012). A correção de viés das saídas dos modelos, ajustada por observações, é um procedimento recomendável nesses estudos, visto que modelos climáticos inevitavel-

mente carregam incertezas e é interessante que o período histórico das simulações seja validado utilizando-se, por exemplo, uma base de dados observacional consolidada.

Essa base, validada e produzida com dados de qualidade, é considerada como a “verdade” em termos de dados observados para o ajuste a ser realizado neste trabalho. O ajuste realizado é baseado na correção de uma função de distribuição acumulada, na qual ajusta-se a frequência da variável, assegurando a variabilidade temporal da série. Como resultado desse processo, a técnica removeu o viés nas simulações do Eta. Como todas as abordagens de *downscaling* estatístico, supõe-se que os vieses em relação às simulações históricas permanecerão constantes no período futuro da projeção (Thrasher et al., 2012).

3. RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados para diferentes cenários de emissões para o Brasil. Todos os dados, sejam do período histórico ou de projeções, receberam ajustes (remoção de erros sistemáticos) de acordo com a metodologia apresentada, e para facilitar a compreensão será utilizada a nomenclatura referente aos períodos futuros - “futuro próximo” (2006-2040), “meio do século” (2040-2070) e “final do século” (2070-2099). A Figura 1 apresenta para o período histórico a irradiação global.

Na Figura 1 (a), (b), (c), (d), na qual é apresentada a distribuição espacial da irradiação solar em todo o território brasileiro, é possível notar que durante todo o ano a maior concentração do recurso solar é verificada no Nordeste brasileiro, e que o mesmo apresenta máximos nos meses da primavera e verão.

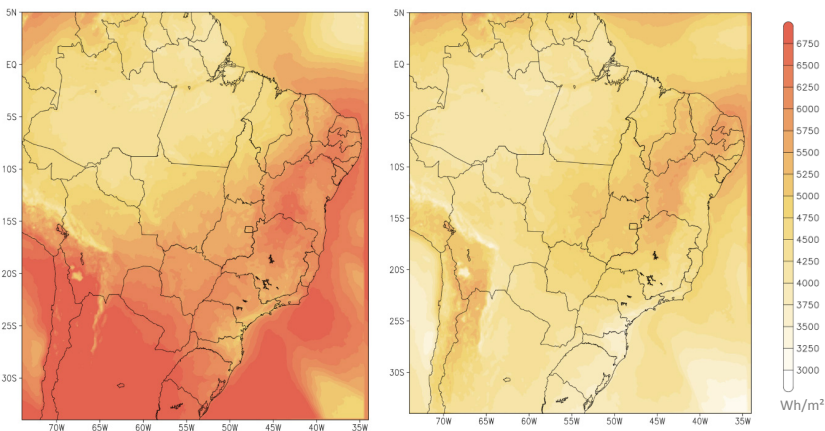


Figura 1 (a)

Figura 1 (b)

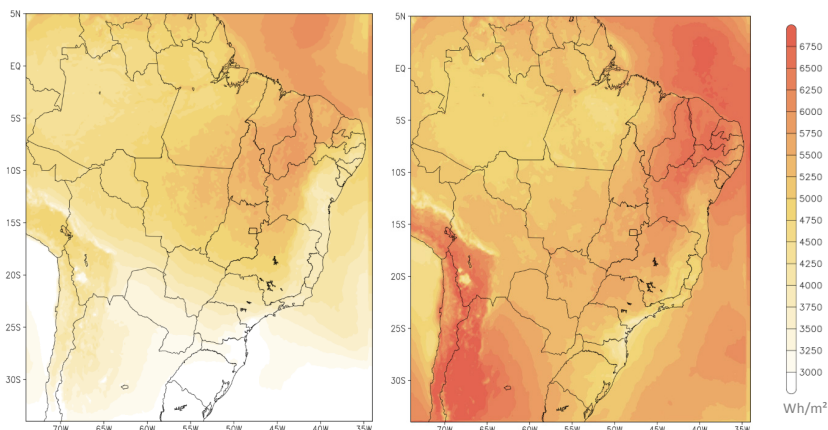


Figura 1 (c)

Figura 1 (d)

Figura 1 – Média sazonal do total diário da irradiância global horizontal (Wh/m^2) para (a) DJF; (b) MAM; (c) JJA e (d) SON para o período histórico do modelo climático Eta-HadGEM2-ES

Também são bastante relevantes os totais da região Sul do país no verão. Os meses de inverno apresentam irradiação solar sensivelmente mais baixa para a região Sul e Sudeste, em especial devido à alta atividade de sistemas frontais no período, incluindo parte da costa nordeste, onde alguns desses sistemas mais intensos atuam, impactando os dias ensolarados. As regiões Centro-Oeste e Norte parecem exibir uma variação intermediária ao longo das quatro estações, com a região Amazônica apresentando uma disponibilidade de média a baixa em relação ao restante do país para o recurso solar em qualquer época do ano - apesar da localização latitudinal - devido à atividade convectiva na região.

As Figuras 2 e 3 apresentam as projeções para os mesmos períodos sazonais, para o futuro próximo, para o meio do século e para o final do século, para a irradiação global horizontal no Brasil, simuladas pelo modelo Eta-HadGEM2-ES em dois cenários de emissão de CO_2 (RCP4.5 e RCP8.5). Já as Figuras 4 e 5 apresentam as variações percentuais das médias sazonais do total diário da irradiação global simuladas pelo mesmo Eta-HadGEM2-ES, em relação ao período histórico, para os dois cenários de emissão – RCP4.5 e RCP8.5. No período de DJF do cenário RCP4.5 (Figura 4a), o Eta-HadGEM2-ES projeta uma redução de 5% a 10% na costa norte e nordeste do país, com regiões localizadas apontando reduções 20% a 30% entre a costa dos estados do Ceará (CE) e Piauí (PI). Também projeta um aumento de 5 a 10% sobre o Sudeste (SE). No cenário RCP8.5 (Figura 5a), por

outro lado, o Eta-HadGEM2-ES projeta um aumento de 5% a 10% no recurso solar para várias regiões do Brasil. Essas regiões incluem parte da região Norte (N), parte do interior do NE, praticamente toda a região SE e Centro-Oeste e norte da região Sul (S). Destaque para os estados de São Paulo (SP) e Minas Gerais (MG), que apresentam aumento entre 10% e 20%. Para MAM, o modelo (Figura 4b) não projeta mudanças relevantes no cenário RCP4.5. Para o cenário 8.5, no entanto, o Eta-HadGEM2-ES (Figura 5b) prevê um aumento de 5% a 10% na costa do Pará e oeste da Amazônia.

Para JJA, no cenário RCP4.5, o Eta-HadGEM2-ES (Figura 4c) projeta uma redução bastante localizada de 5% a 10% no oeste do Rio Grande do Sul (RS). No cenário RCP8.5, o mesmo modelo (Figura 5c) prevê uma redução da irradiação solar na costa do NE, entre 5% a 10%.

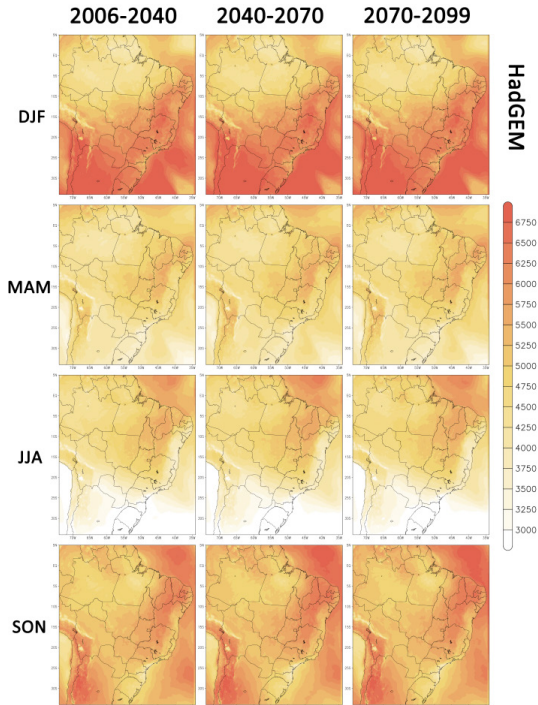


Figura 2 – Projeções para média sazonal do total diário da irradiação global horizontal (Wh/m^2) para (da linha superior para a mais inferior) DJF, MAM, JJA e SON e para (da coluna da esquerda para a direita) os três períodos futuros (futuro próximo, meio do século e final do século) simulado pelo modelo climático Eta-HadGEM2-ES no cenário RCP4.5.

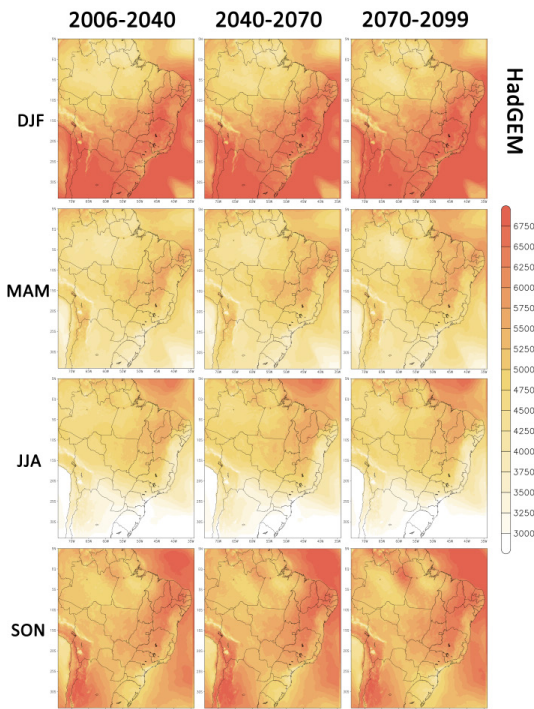


Figura 3 – Projeções para média sazonal do total diário da irradiação global horizontal (Wh/m^2) para (da linha superior para a mais inferior) DJF, MAM, JJA e SON e para (da coluna da esquerda para a direita) os três períodos futuros (futuro próximo, meio do século e final do século) simulado pelo modelo climático Eta-HadGEM2-ES no cenário RCP8.5.

Para SON no RCP4.5, o Eta-HadGEM2-ES (Figura 4d) prevê uma redução de 5 % a 10% na costa N e NE e no estado do RS. No cenário RCP8.5, o Eta-HadGEM2-ES (Figura 5d) prevê aumento em uma pequena área do SE.

Considerando o meio do século (período 2040-2070), o Eta-HadGEM2-ES prevê para DJF no cenário RCP4.5 (Figura 4e) uma redução de 5% a 10% na região Sudeste e parte da região Sul. No RCP8.5, o Eta-HadGEM2-ES (Figura 5e) prevê aumento nas mesmas localidades citadas, com alguns pontos chegando a aumento de 10% a 20%, principalmente entre os estados de SP e MG. Para MAM o Eta-HadGEM2-ES prevê aumento de 5% a 10% na costa N com pontos localizados de até 20% em ambos os cenários (Figura 4f e 5f).

Para JJA, o Eta-HadGEM2-ES projeta redução de 5% a 10% do recurso solar no RS no cenário RCP4.5 (Figura 4g) e aumento de 5%

a 10% em áreas da região N do país no RCP8.5 (Figura 5g). Em SON, há projeções de redução do recurso solar para o RS no cenário RCP4.5 pelo modelo Eta-HadGEM2-ES (Figura 4h). No RCP8.5, o Eta-HadGEM2-ES (Figura 5h) também prevê esta redução para o RS, além de um aumento de 5% a 10% para uma faixa transversal que se estende do Sudeste até o oeste da Amazônia.

Considerando as projeções para o final do século (2070-2099), o trimestre DJF no RCP4.5 tem previsto uma redução de 5% a 10% do recurso solar no NE (Figura 4i) O Eta-HadGEM2-ES prevê ainda um aumento de 5% a 10% no SE. No RCP8.5, Eta-HadGEM2-ES (Figura 5i) projeta aumento da irradiação solar para muitas áreas do Brasil. Para MAM no RCP4.5, o Eta-HadGEM2-ES (Figura 4j) prevê aumento de 5% a 10% em pequenas áreas do país. No RCP8.5 (Figura 5j) essa área se estende e em alguns pontos a previsão de aumento é de até 30%.

Para JJA e SON no RCP4.5, o Eta-HadGEM2-ES (Figura 6k e 6l) faz a recorrente projeção de redução de 5% a 10% sobre o RS. No RCP8.5, a redução de 5% a 10% no RS persiste (Figura 5k, 5l), e o Eta-HadGEM2-ES adiciona um aumento de 5% a 10% (com picos de até 20%) em uma faixa transversal que vai do SE até a Amazônia.

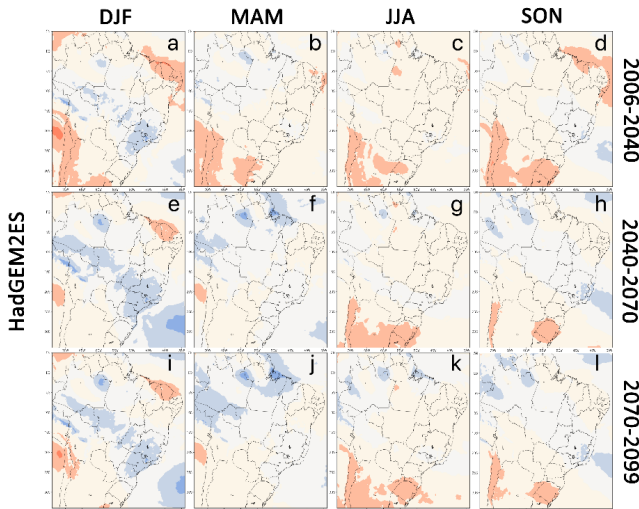


Figura 4 – Projeções da variação percentual da média sazonal do total diário da irradiação global horizontal (%) simuladas pelo Eta-HadGEM2-ES no cenário RCP4.5 para os períodos futuros (futuro próximo, meio do século e final do século) em relação ao período histórico.

4. CONCLUSÕES

Este trabalho tinha como objetivo apresentar as avaliações de modelos climáticos a respeito do potencial solar futuro, considerando-se diferentes cenários de emissões associados às mudanças climáticas. Essas avaliações foram realizadas através da análise das simulações do modelo Eta-HadGEM2-ES, o qual foi aninhado a um modelo de mesoescala conhecido e respeitado na comunidade científica (Eta-CPTEC). Seus resultados foram ajustados a partir de uma metodologia robusta, que permite identificar três principais padrões espaciais da variação do recurso solar. O primeiro deles é um padrão de redução de 5% a 10% do recurso solar na costa Norte / Nordeste (com picos de até 20% em pontos isolados em alguns casos).

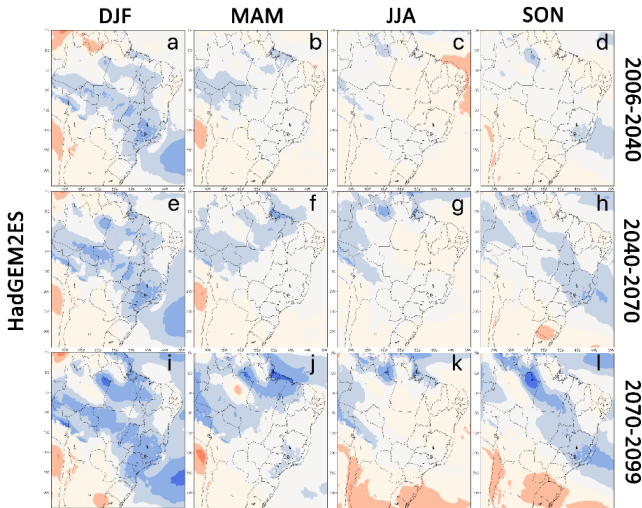


Figura 5 – Projeções da variação percentual da média sazonal do total diário da irradiação global horizontal (%) simuladas pelo Eta-HadGEM2-ES no cenário RCP8.5 para os períodos futuros (futuro próximo, meio do século e final do século) em relação ao período histórico.

O segundo padrão é uma redução de 5% a 10% no RS (ou na região Sul) para JJA e SON para todos os períodos futuros, e para SON no RCP 8.5. O último padrão geral observado é de uma banda transversal do Sudeste até a Amazônia, projetando um aumento de 5% a 10% no recurso solar para DJF em todos os períodos.

Estes resultados são bastante relevantes, pois afetam regiões hoje exploradas para a geração solar e indicam a necessidade de se buscar ações focadas no comportamento futuro dos recursos, subsidiando políticas de planejamento que já estão em andamento. Além disso, reforçam a contribuição de estudos como este para o planejamento da expansão do setor, em especial vislumbrando estratégias de adaptação do parque gerador durante a transição para fontes de energia mais dependentes do clima.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao suporte financeiro da Petrobras, através dos Projetos ANEEL PD-00553-0034/2016 e PD-00553-0042/2016. Agradecem também ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia para Mudanças Climáticas - INCT/MC (através dos processos CNPq 573797/2008-0 e FAPESP 2008/57719-9 e à FAPESP, processo 2019/05361-8.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CROOK, J. A.; AL., E. Climate change impacts on future photovoltaic and concentrated solar power energy output. *Energy Environ. Sci.*, v. 4, p. 3101–3109, 2011.

EHRET, U. et al. Should we apply bias correction to global and regional climate model data? *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, v. 16, n. 9, p. 3391-3404, 2012.

GUDMUNDSSON, L. et al. Downscaling RCM precipitation to the station using quantile mapping - a comparison of methods. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* [S.l.], p. 3383. 2012. (16).

HUBER, I.; AL., E. Do climate models project changes in solar resources? *Solar Energy*, v. 129, p. 65–84, 2016.

JONG, P.; AL., E. Estimating the impact of climate change on wind and solar energy in Brazil using a South American regional climate model. *Renewable Energy*, v. 141, p. 390-401, 2019.

MME/EPE. Plano Decenal de Expansão de Energia 2029 / Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2019.

PEREIRA, E. B. et al. Atlas Brasileiro de Energia Solar. 2ª edição. ed. São José dos Campos: LABREN/CCST/INPE, 2017.

RÄTY, O.; RÄISÄNEN, J.; YLHÄISI, J. Evaluation of delta change and bias correction methods for future daily precipitation: intermodel cross-validation using ENSEMBLES simulations. *Clim. Dyn.*, v. 9-10, n. 42, p. 2287-2303, 2014.

TEUTSCHBEIN, C.; SEIBERT., J. Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: review and evaluation of different methods.. *J. Hydrol.*, v. 456-457, n. 0, p. 12-29, 2012.

THRASHER, B. et al. Technical Note: Bias correcting climate model simulated daily temperature extremes with quantile mapping. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012.