


Artigo

Projeções de Radiação Solar Incidente à Superfície e Nebulosidade Para a Região Nordeste do Brasil Através de um Conjunto de Modelos Climáticos

Paula Rose de Araújo Santos¹ , Susane Eterna Leite Medeiros^{2*} , Louise Pereira da Silva¹ ,
Raphael Abrahão³ ¹*Universidade Federal da Paraíba, Departamento de Engenharia Mecânica, Pós Graduação em Engenharia Mecânica, João Pessoa, PB, Brasil.*²*Universidade Estadual de Feira de Santana, Departamento de Tecnologia, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Feira de Santana, BA, Brasil.*³*Universidade Federal da Paraíba, Centro de Energias Renováveis e Alternativas, Departamento de Engenharia de Energias Renováveis, João Pessoa, PB, Brasil.*

Recebido em: 18 de Junho de 2023 - Aceito em: 23 de Julho de 2024

Resumo

Estudos indicam a intensificação das mudanças climáticas, com aumento da temperatura do ar, alterações no padrão das chuvas e maior variabilidade para outros elementos climáticos. O setor energético renovável pode contribuir com a redução dos impactos na atmosfera. Todavia, as fontes renováveis dependem do clima e o aumento da demanda por energia exige um planejamento coerente com as novas condições. Este estudo teve como objetivo apresentar os resultados relacionados à radiação solar incidente na superfície e à nebulosidade para o Nordeste brasileiro. Utilizou-se um conjunto de modelos climáticos globais (BESM, HadGEM2-ES e CanESM2) associados ao regional Eta, para projetar dados futuros para os períodos de 2041-2069 e 2070-2099, comparando-os ao período histórico de 1961-1990, considerando os cenários RCP4.5 e RCP8.5 aplicados pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. Os resultados evidenciaram o aumento predominante da radiação solar incidente (média de 1,7% pelo HadGEM2-ES e 2,5% pelo CanESM2), exceto para o BESM (-3,5%) e redução para a nebulosidade, com valores médios entre -1,1% (BESM) e -53,4% (CanESM2). Esses resultados podem favorecer a produção de energia solar fotovoltaica nesta região, sendo assim, tem-se elevada expectativa quanto à diversificação da matriz energética brasileira, redução da dependência de combustíveis fósseis e aumento da segurança energética.

Palavras-chave: mudanças climáticas, RCP4.5, RCP8.5, parques fotovoltaicos, energia solar, energia fotovoltaica.

Projections of Solar Radiation Incident on the Surface and Cloudiness for the Northeast Region of Brazil Through a Set of Climate Models

Abstract

Studies indicate the intensification of climate change, with an increase in air temperature, changes in rainfall patterns, and greater variability in other climatic elements. The renewable energy sector can contribute to reducing atmospheric impacts. However, renewable sources depend on the climate, and the increasing demand for energy requires planning that is coherent with new conditions. This study aimed to present results related to incident solar radiation on the surface and cloudiness for the Northeast of Brazil. A set of global climate models (BESM, HadGEM2-ES, and CanESM2) associated with the regional Eta model was used to project future data for the periods 2041-2069 and 2070-2099, comparing them to the historical period of 1961-1990, considering the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios applied by the Intergovernmental Panel on Climate Change. The results showed a predominant increase in incident solar radiation (an average of 1.7% by HadGEM2-ES and 2.5% by CanESM2), except for BESM (-3.5%), and a reduction in cloudiness, with average values between -1.1% (BESM) and -53.4% (CanESM2). These results may favor the production of photovoltaic solar energy in this region, raising high expectations for the diversification of the Brazilian energy matrix, reducing dependence on fossil fuels, and increasing energy security.

Keywords: climate change, RCP4.5, RCP8.5, photovoltaic parks, solar energy, photovoltaic energy.

1. Introdução

Baseados nos oito objetivos de Desenvolvimento do Milênio, foram criados os 17 objetivos do desenvolvimento sustentável (ODS), os quais buscam atingir o equilíbrio entre o social, o econômico e o ambiental até 2030 (Nyasimi e Peake, 2015; Leal Filho *et al.*, 2018). O ODS 13 trata diretamente das ações contra a mudança global do clima. Essas mudanças climáticas geram uma série de transtornos para a vida em sociedade, desde o aumento dos eventos extremos aos impactos nos ecossistemas, na produtividade alimentar, na saúde e no crescimento econômico causando maiores transtornos aos mais pobres (Nyasimi e Peake, 2015).

Um dos fatores que ajudam na mitigação das questões climáticas é a utilização das energias renováveis em detrimento das provenientes dos combustíveis fósseis, como por exemplo as energias energia solar e eólica (Ravestein *et al.*, 2018; Mohajeri *et al.*, 2019; De Jong *et al.*, 2019). Todavia, deve-se levar em consideração que as fontes renováveis também sofrem com as alterações climáticas, as quais poderão causar modificações no regime de chuvas, aumento da temperatura do ar e das secas (Tanajura *et al.*, 2010; Prudhomme *et al.*, 2013; Marengo e Bernasconi, 2015; Guimarães *et al.*, 2016; Marengo *et al.*, 2017), mudanças na velocidade e direção dos ventos, na radiação solar e em outras características ambientais (Wachsmuth *et al.*, 2013; Santos *et al.*, 2015; Ohunakin *et al.*, 2015; Bartók *et al.*, 2017; Santos *et al.*, 2018; De Jong *et al.*, 2019).

Os modelos climáticos globais e regionais são empregados para entender e prever essas mudanças climáticas (Pasičko *et al.*, 2012; Queiroz *et al.*, 2016). São ferramentas baseadas em fórmulas matemáticas a fim de recriar os processos químicos e físicos que impulsionam o clima terrestre. O primeiro modelo de circulação geral foi desenvolvido em Princeton, nos Estados Unidos, no Laboratório de Dinâmica dos Fluidos da NOAA ao final dos anos de 1960 (NOAA, 2017). Apesar de ser a principal ferramenta para projetar cenários climáticos futuros, é necessário levar em consideração as incertezas na modelagem e, desta forma, aplicar mais de um modelo climático nas projeções (Pasičko *et al.*, 2012; Queiroz *et al.*, 2016).

Junto aos modelos são utilizados os cenários RCP (Caminhos Representativos de Concentração) que consideram tanto cenários futuros ambientalmente mais otimistas até cenários mais pessimistas, levando em consideração a emissão e a concentração dos gases de efeito estufa na atmosfera, e questões econômicas, políticas e sociais (Thomson *et al.*, 2011; Riahi *et al.*, 2011; IPCC, 2023).

A radiação solar é de extrema importância para assegurar a vida na Terra, esse parâmetro é responsável pelos movimentos atmosféricos, sendo o principal componente na troca de energia entre a superfície terrestre e a atmos-

fera. O ciclo hidrológico e o sistema climático são amplamente impulsionados pela incidência da radiação, além de influenciar na circulação atmosférica, na produção agrícola e na geração energética solar (Wild *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2016; Tao *et al.*, 2021).

O potencial fotovoltaico no Brasil tem um futuro promissor e é perceptível o aumento da procura por sistemas fotovoltaicos independentes nos últimos anos. Segundo dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), em março de 2022, a potência instalada em micro e minigeração distribuída de energia elétrica alcançou a marca de 10 GW. Esse quantitativo é suficiente para abastecer aproximadamente 5 milhões de residências no país. De acordo com Oliveira *et al.* (2022), a região Nordeste do Brasil apresenta o maior potencial para geração de energia solar do país devido à grande radiação incidente.

Para a produção de energia solar, além da radiação, a cobertura das nuvens é uma propriedade de grande importância a ser considerada. Esta será influenciada pelas partículas atmosféricas em suspensão as quais poderão aumentar a cobertura das nuvens (Burnett *et al.*, 2014). As nuvens são responsáveis por cobrir 60% da superfície terrestre e influenciam no balanço radiativo e também na distribuição da temperatura, modulação do albedo global e na circulação geral atmosférica (Ohunakin *et al.*, 2015; Pyrina *et al.*, 2015). Além disso, o aumento da nebulosidade provoca a redução da irradiância UV (Foyo-moreno *et al.*, 2003) e junto à elevação solar são os dois fatores que mais influenciam na irradiação solar total (Santos *et al.*, 2011).

Levando em consideração as mudanças climáticas e os impactos que poderão causar na geração de energia solar fotovoltaica, o presente artigo teve por finalidade projetar dados futuros para a radiação solar de onda curta incidente à superfície e para a nebulosidade nos períodos futuros de 2041-2069 e 2070-2099 na região Nordeste do Brasil.

2. Material e Métodos

2.1. Caracterização da área

A região Nordeste está localizada no extremo leste da América do Sul e é banhada pelo Oceano Atlântico (Costa *et al.*, 2020), sendo a terceira maior região do país com aproximadamente 1.552.167,01 km², que corresponde a cerca de 18% do território nacional. O Nordeste está dividido em nove estados, com população estimada de 57.374.243 pessoas em 2020 (IBGE, 2019; IBGE, 2020; Lima *et al.*, 2019) (Fig. 1).

A região Nordeste apresenta altas temperaturas médias, as quais variam entre 20 °C e 28 °C e precipitação anual com grande variabilidade espacial e temporal (Lima *et al.*, 2019; Costa *et al.*, 2020). A partir da classificação

de Köppen-Geiger, a região apresenta clima predominantemente tropical, com presença do clima semiárido que se estende por importantes partes de todos os estados, com exceção do estado do Maranhão (Alvares *et al.*, 2013). O clima tropical, observado nos estados da Bahia, Ceará, Maranhão e Piauí, apresenta duas estações bem definidas (uma seca e outra chuvosa). Já o tipo climático semiárido se caracteriza pelos baixos valores de precipitação pluviométrica (Cavalcanti *et al.*, 2009).

De acordo com a ANEEL (2010), a insolação solar diária na região Nordeste tem as maiores taxas do Brasil. A região encontra-se próxima à linha do Equador, o que contribui para que não haja grandes variações na duração solar do dia e o nível da radiação solar seja alto (Ferreira *et al.*, 2018; Oscar Junior *et al.*, 2015). Segundo a ANEEL (2022), a região Nordeste do Brasil apresenta 158 empreendimentos fotovoltaicos em operação espalhados pelos nove estados, sendo que a maior parte das usinas em operação está localizada no estado da Bahia (Fig. 1). Com relação às usinas fotovoltaicas em construção, a maior parte está localizada nos estados do Piauí, Paraíba, Pernambuco e Bahia (ANEEL, 2022).

2.2. Projeções climáticas

As projeções foram realizadas a partir de um conjunto de três modelos climáticos globais associados a um modelo climático regional obtidos a partir do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE) na plataforma do Projeta (Chou *et al.*, 2014a; Chou *et al.*, 2014b; Brazil, 2016; Lyra *et al.*, 2018). Os modelos globais utilizados foram o Modelo Brasileiro do Sistema Terrestre (BESM) (INPE, 2019), o *Hadley Centre Global Environment Model* versão 2 - *Earth System* (HadGEM2-ES), e o *Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis* (CanESM2) (Mohan e Bhaskaran, 2019) e o modelo regional foi o Eta (Ruffato-Ferreira *et al.*, 2017). O *downscaling* dinâmico, aninhamento entre modelos climáticos globais (GCMs) e modelos climáticos regionais (RCMs), demonstra ser uma ferramenta adequada a fim de projetar dados climáticos mais confiáveis, devido à maior resolução dos RCMs (Virgilio *et al.*, 2022).

O modelo BESM é aninhado ao modelo oceânico MOM4 (*Modular Ocean Model 4*) e seus processos da

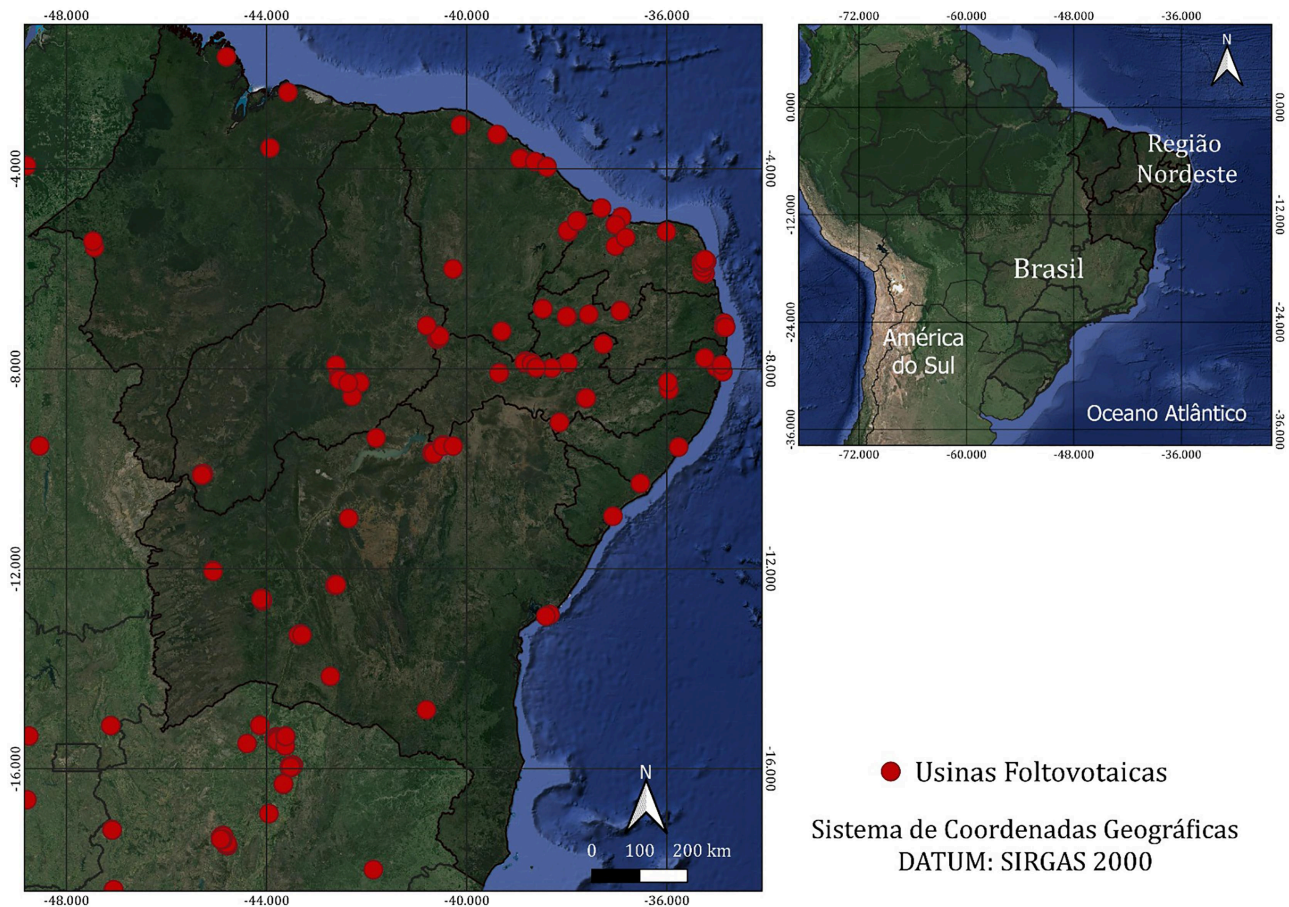


Figura 1 - Área de estudo - região Nordeste do Brasil e usinas fotovoltaicas em operação ou em construção na área de estudo. Adaptado de IBGE (2017); ANEEL (2022).

superfície terrestre são representados a partir do modelo SSIB (Modelo Simples da Biosfera) (Chou *et al.*, 2014a). O BESM foi desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e está baseado na estrutura do modelo acoplado oceano-atmosfera do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) (Veiga *et al.*, 2019) e apresenta resolução de $1,875^\circ \times 1,875^\circ$ latitude x longitude (INPE, 2019). A segunda geração da família do HadGEM, o HadGEM2-ES, inclui componentes atmosféricos, de gelo marinho e oceano (Martin *et al.*, 2011) e resolução $1,875^\circ \times 1,250^\circ$ latitude x longitude (Mohan e Bhaskaran, 2019). Este modelo compreende a atmosfera física e os componentes do oceano com esquemas para caracterizar os aspectos do sistema terrestre (Collins *et al.*, 2011). A segunda geração do modelo canadense do sistema terrestre, CanESM2, é aninhado pelo modelo físico-oceânico-atmosfera (CanCM4), acoplado a um modelo de carbono terrestre (CTEM) e um modelo de carbono oceânico (CMOC) (Sospedra-Alfonso e Merryfield, 2017) e com resolução de $2,8125^\circ \times 2,8125^\circ$ latitude x longitude (Mohan e Bhaskaran, 2019).

Os processos de superfície terrestre do modelo regional Eta são representados pelo modelo de superfície da terra Noah (Ek *et al.*, 2003), a microfísica das nuvens é baseada no esquema de Zhao *et al.* (1997), a radiação de ondas longas é representada por Fels e Schwarzkopf (1975) e a radiação de ondas curtas por Lacis e Hansen (1974).

Associados aos modelos climáticos utilizaram-se dois cenários dos Caminhos Representativos de Concentração: o RCP4.5, ambientalmente mais otimista, e o RCP8.5, mais pessimista. No cenário RCP4.5 a forçante radiativa seria de $4,5 \text{ W/m}^2$ e a concentração de CO_2 em 650 ppm se estabilizaria após o ano de 2100 (Thomson *et al.*, 2011). No caso do RCP8.5, além de um alto crescimento populacional, a forçante radiativa alcançaria $8,5 \text{ W/m}^2$, e a concentração de CO_2 seria superior a 1370 ppm e continuariam subindo após 2100 (Riahi *et al.*, 2011).

As projeções foram realizadas para os parâmetros de radiação de onda curta incidente à superfície e nebulosidade para os períodos futuros de 2041-2069 e 2070-2099 comparados ao período de referência de 1961-1990, por ser considerada uma normal climatológica de referência. As projeções foram realizadas para 3237 pontos da região Nordeste do Brasil, os quais encontram-se a uma distância de aproximadamente 22,3 km um do outro.

3. Resultados e Discussão

3.1. Radiação de onda curta incidente à superfície

As mudanças na radiação de onda curta incidente à superfície anual projetadas por meio dos modelos Eta-

BESM, Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 associados aos cenários RCP4.5 e RCP8.5 estão apresentadas na Fig. 2. As projeções derivadas dos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 evidenciaram o provável aumento da radiação, sobretudo no RCP8.5. De acordo com as projeções desses dois modelos, o aumento será mais intenso para áreas localizadas no estado do Maranhão (Fig. 2).

Os dados projetados evidenciaram o aumento da radiação acima de 20% no cenário mais pessimista, no modelo Eta-CanESM2, ao final do século XXI ao norte do Maranhão. Além disso, na maior parte do estado do Maranhão e no oeste da Bahia observaram-se as menores incertezas nos dados projetados. A elevação da radiação nessas regiões foi percebida inclusive pelo modelo Eta-BESM (no cenário RCP8.5), o qual apresentou dados divergentes dos outros modelos, com projeções de redução da radiação em outras áreas da região Nordeste. Resultados de aumento da radiação para o Nordeste do Brasil sob o RCP8.5 em 2070-2099 também foram observados por De Jong *et al.* (2019).

Apesar dos resultados predominantes de aumento da radiação nos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2, observou-se uma possível redução no cenário mais otimista, principalmente em 2041-2069 no modelo Eta-HadGEM2-ES (Fig. 2). No caso do estudo realizado por Oscar Junior *et al.* (2015) reduções na radiação solar foram projetadas pelo modelo Eta-MIROC5 sob o RCP8.5. Os autores projetaram diminuição da radiação de cerca 6% para algumas regiões. No presente trabalho, sob o RCP4.5 a redução da radiação é inferior a 3% no modelo Eta-HadGEM2-ES e inferior a 2% no modelo Eta-CanESM2.

Ao contrário do que ocorre com os modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2, para os quais o aumento da radiação é predominante no Nordeste do Brasil, no modelo Eta-BESM os resultados de diminuição da radiação prevalecem, principalmente no cenário mais otimista. Ainda assim, um pequeno aumento da radiação foi observado com o Eta-BESM para os estados do Maranhão, Bahia e uma pequena porção do estado do Piauí sob o RCP8.5 (Fig. 2).

Resultados para uma mesma área que se contrapõem também foram observados na Europa onde a média de cinco GCM's apontaram o aumento da radiação solar na superfície e os RCM's projetaram uma diminuição observada em três dos quatro modelos regionais empregados (CCLM, RCA4 e WRF) até o final do século XXI no RCP8.5 (Bartók *et al.*, 2017).

Com a finalidade de observar a dispersão dos dados futuros a partir dos modelos empregados, calculou-se o desvio padrão. Os valores médios de desvio padrão para os cenários evidenciaram que os resultados ficaram próximos à média, o que demonstra que os dados da amostra são homogêneos, ou seja, há uma menor dispersão entre eles (Tabela 1).

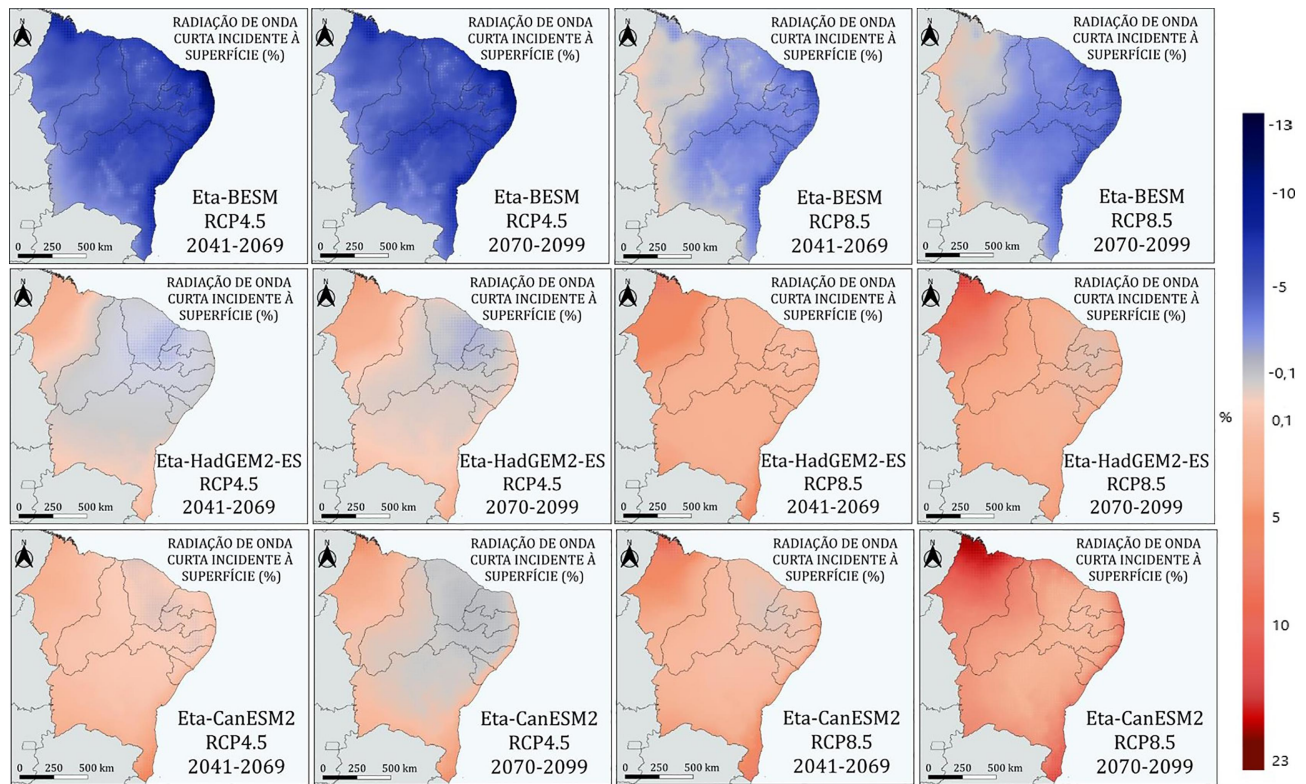


Figura 2 - Anomalias projetadas para radiação de onda curta incidente à superfície nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 nos períodos de 2041-2069 e 2070-2099 para os modelos Eta-BESM, Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 na região Nordeste do Brasil.

Tabela 1 - Média e desvio padrão (DP) dos modelos Eta-BESM, Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 considerando os cenários RCP4.5 e RCP8.5 nos períodos de 2041-2069 e 2070-2099 para a radiação solar incidente à superfície no Nordeste do Brasil.

	Eta-BESM		Eta-HadGEM2-ES		Eta-CanESM2	
	Média (%)	DP (%)	Média (%)	DP (%)	Média (%)	DP (%)
RCP4.5 (41-69)	-4,7	1,9	-0,3	1,3	1,1	1,2
RCP4.5 (70-99)	-4,5	1,8	0,3	1,5	1,2	1,5
RCP8.5 (41-69)	-2,2	1,5	3,2	1,5	2,1	2,0
RCP8.5 (70-99)	-2,4	1,9	3,4	2,7	5,7	3,7
Valores médios	-3,5	1,8	1,7	1,8	2,5	2,1

3.2. Nebulosidade

As projeções derivadas dos modelos climáticos Eta-BESM, Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 associados aos cenários RCP4.5 e RCP8.5 para nebulosidade podem ser vistas na Fig. 3. Assim como ocorre nos resultados para radiação, os dados apresentados pelo modelo Eta-BESM contrastaram com os dos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2. No Eta-HadGEM2-ES e no Eta-CanESM2 a nebulosidade apresentou redução em toda a região Nordeste. Por outro lado, no Eta-BESM as projeções indicaram aumento da nebulosidade para a maior parte da região nos dois cenários estudados, ocorrendo de forma mais intensa sob o RCP4.5. Contudo, as projeções do Eta-BESM para o período 2070-2099 no cenário e

RCP8.5 foram um pouco mais congruentes com as dos outros dois modelos (Fig. 3).

O sul da Bahia foi a área de menor incerteza em relação à redução de nebulosidade. Resultados para outras áreas no mundo também mostraram a diminuição da nebulosidade, como por exemplo na Europa, onde a média dos cinco GCM's utilizados apontaram redução no RCP8.5 até o final do século XXI (Bartók *et al.*, 2017). Os resultados do presente estudo sugeriram que a redução da nebulosidade é mais acentuada sob o RCP8.5, sobretudo para o final do século XXI no Eta-HadGEM2-ES e no Eta-CanESM2. O estudo realizado por Zulunga *et al.* (2021) evidenciou que no período de 1980-2016, a região Nordeste apresentou a menor tendência de

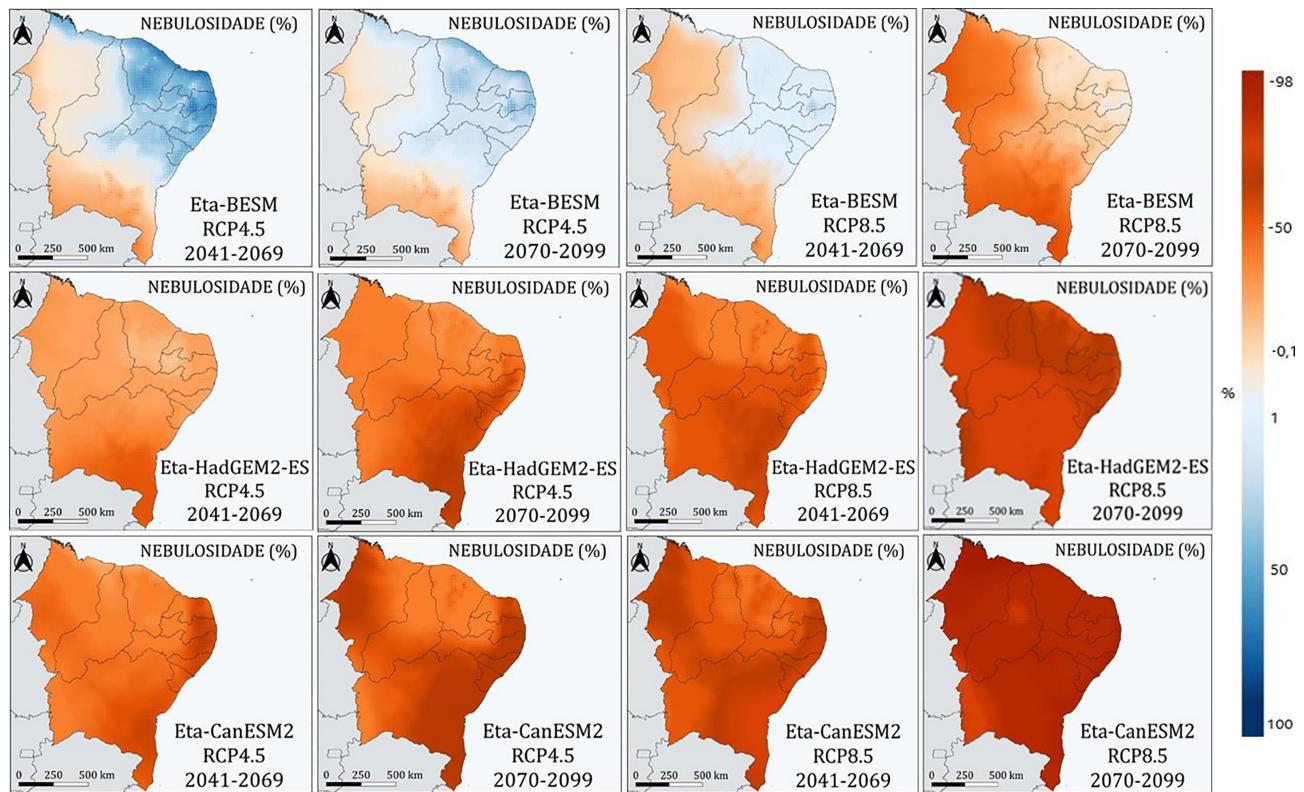


Figura 3 - Anomalias projetadas para nebulosidade nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 nos períodos de 2041-2069 e 2070-2099 para os modelos Eta-BESM, Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 na região Nordeste do Brasil.

cobertura das nuvens no Brasil, sobretudo nos estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Piauí e Bahia. Os dados futuros projetados no presente trabalho indicaram a redução predominante da nebulosidade, o que pode demonstrar uma possível tendência para a pouca nebulosidade na região.

As projeções no presente trabalho demonstraram que enquanto a radiação aumentará, a nebulosidade diminuirá para os modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2. No caso do modelo Eta-BESM acontecerá o inverso. Esses resultados são coerentes dentro de cada modelo, já que uma redução na nebulosidade facilitará a chegada de radiação de onda curta à superfície. [Foyo-Moreno et al. \(2003\)](#) afirmaram que o aumento da nebulosidade leva a

significativas reduções na irradiância UV que alcança a superfície. Segundo [Zulunga et al. \(2021\)](#), a redução da cobertura das nuvens contribuiu para esse efeito. Resultados análogos foram projetados no presente estudo, em que o aumento futuro da radiação se contrapõe com a redução da nebulosidade.

Os resultados para o cálculo do desvio padrão evidenciaram que o modelo Eta-BESM apresentou o maior desvio padrão quando comparados aos observados para os modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2. Em consequência, esse resultado elevado indica uma maior variabilidade dos dados no modelo Eta-BESM, enquanto que para os modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 os dados são mais homogêneos ([Tabela 2](#)).

Tabela 2 - Média e desvio padrão (DP) dos modelos Eta-BESM, Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 considerando os cenários RCP4.5 e RCP8.5 nos períodos de 2041-2069 e 2070-2099 para a nebulosidade.

	Eta-BESM		Eta-HadGEM2-ES		Eta-CanESM2	
	Média (%)	DP (%)	Média (%)	DP (%)	Média (%)	DP (%)
RCP4.5 (41-69)	15,5	24,9	-29,0	8,4	-39,6	7,6
RCP4.5 (70-99)	8,9	22,5	-41,7	7,6	-45,8	6,8
RCP8.5 (41-69)	-3,8	17,2	-45,7	6,0	-51,1	9,1
RCP8.5 (70-99)	-25,0	17,4	-60,8	7,7	-77,0	5,1
Valores médios	-1,1	20,5	-44,3	7,4	-53,4	7,2

Como pode ser visto na [Fig. 1](#), a região Nordeste do Brasil concentra um número expressivo de usinas fotovoltaicas em operação e algumas em construção, as quais poderão ser afetadas pelas mudanças climáticas de forma predominante para os modelos e cenários empregados no presente trabalho. As mudanças projetadas serão positivas para as usinas fotovoltaicas, com aumento da radiação de onda curta incidente à superfície e redução da nebulosidade. Os autores [Zhang *et al.* \(2018\)](#) observaram que os recursos solares globais, de forma geral, aumentarão durante o século XXI sob os cenários RCP2.6 e RCP8.5.

Seguindo as projeções do modelo Eta-BESM, que não foram as predominantes observadas no presente trabalho, algumas das áreas onde estão localizadas as usinas fotovoltaicas sofrerão com a redução da radiação solar incidente à superfície e incremento da nebulosidade, principalmente sob o RCP4.5. Acontece o mesmo no modelo Eta-HadGEM2-ES, também para o cenário mais otimista, sobretudo em 2041-2069.

No estado do Maranhão há cinco usinas fotovoltaicas em operação. As que se encontram no município de Imperatriz (a oeste do estado do Maranhão) estão localizadas em uma área onde as projeções sugeriram o aumento da radiação e redução da nebulosidade em todos os cenários e modelos empregados, com exceção do RCP4.5 no modelo Eta-BESM ([Fig. 1](#), [Fig. 2](#) e [Fig. 3](#)). No geral, as usinas fotovoltaicas no Maranhão encontram-se em áreas onde as projeções são favoráveis para a elevação da radiação solar e redução da nebulosidade nos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2.

Em seu estudo, [De Jong *et al.* \(2019\)](#) estimaram o impacto das mudanças no clima nos recursos de energia solar e eólica do Brasil e evidenciaram resultados para algumas áreas em que estão localizadas usinas fotovoltaicas e eólicas. Segundo os autores, os aumentos projetados na radiação solar são estatisticamente insignificantes para os parques solares de Aquiraz (Ceará), Coremas/Malta (Paraíba) e Areia Branca (Rio Grande do Norte). Por sua vez, nos parques de Bom Jesus Lapa, Tabocas Brejo Velho, Salvador e Juazeiro (Bahia); Agrestina (Pernambuco); Ribeira do Piauí/João Costa (Piauí); Areia Branca (Rio Grande do Norte) e em outros parques no Brasil os aumentos projetados da radiação foram estatisticamente significativos.

Segundo o estudo de [Zulunga *et al.* \(2022\)](#), mesmo com o aumento da disponibilidade do recurso solar no Brasil, o aumento da temperatura do ar anulará os efeitos positivos de aumento da radiação solar de ondas curtas devido à sensibilidade dos sistemas fotovoltaicos atuais, já que as altas temperaturas reduzem a eficiência dos módulos fotovoltaicos.

Por fim, os resultados para radiação solar incidente à superfície e a nebulosidade se apresentaram de forma inversamente proporcional. De forma geral, os modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 projetaram resultados

aproximados entre si, enquanto o modelo Eta-BESM apresentou dados divergentes aos desses dois modelos.

4. Conclusões

O presente estudo teve como objetivo projetar resultados futuros para radiação solar de onda curta incidente à superfície e nebulosidade na região Nordeste do Brasil a fim de evidenciar as regiões em que as mudanças nas variáveis atmosféricas podem impactar na produção energética fotovoltaica. Foram realizadas projeções a partir dos modelos Eta-BESM, Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 associados aos cenários RCP4.5 e RCP8.5 para 2041-2069 e 2070-2099.

No geral, a média para os dados de radiação evidenciaram aumento acima de 3% nos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 sob o RCP8.5 ao final do século XXI. Entretanto, o modelo Eta-BESM divergiu, apresentando redução da radiação acima de 2% em todos os períodos e cenários estudados, com resultados acima de 4% sob o RCP4.5. As diferenças entre os modelos variaram em média entre 53% (Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2) e -173,2% (Eta-BESM e Eta-CanESM2), considerando os períodos (2041-2069 e 2070-2099) e os diferentes cenários.

No caso da nebulosidade, os resultados indicaram redução acima de 40% sob o RCP8.5 nos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2, com exceção do RCP4.5 em 2041-2069. O modelo Eta-BESM também foi divergente para nebulosidade, com aumentos projetados acima de 8% sob o RCP4.5. Os modelos apresentaram diferenças menores entre as projeções. Contudo ainda variaram em média entre 17% (Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2) e 97,9% (Eta-BESM e Eta-CanESM2).

Assim, enquanto os modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 projetaram predominantemente o aumento na radiação solar incidente à superfície, o modelo Eta-BESM vai de encontro a estes e mostra uma redução futura para a maior parte do Nordeste do Brasil. Para a nebulosidade o modelo Eta-BESM também vai de encontro ao que foi projetado nos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2. Os dados apresentados pelo modelo Eta-BESM apresentam as maiores incertezas, tendo em vista que os modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 geraram resultados bastante semelhantes e que são compatíveis aos projetados em outros estudos, o que demonstra uma maior coerência nas projeções. As diferenças entre os resultados apresentados reforçam a necessidade de estudos relacionados à quantificação de incertezas e otimização dos modelos.

As projeções dos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 evidenciaram pequenas reduções na radiação, pontualmente, para algumas áreas do Nordeste do Brasil. Em algumas dessas localidades encontram-se usinas fotovoltaicas em operação e em construção. Como as

projeções indicaram pequenas diminuições, é possível que as usinas fotovoltaicas não sejam afetadas.

De acordo com os resultados dos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2, o aumento da radiação é mais intenso sob o RCP8.5, o que poderia gerar um cenário mais favorável para produção de energia fotovoltaica. Percebe-se que no estado do Maranhão há poucas usinas fotovoltaicas, todavia, as projeções de aumento na radiação solar incidente à superfície ocorreram em todos os cenários nos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2, o que pode indicar que o estado é uma área potencial para a produção de energia fotovoltaica. Entretanto, é importante observar que a radiação e a nebulosidade não são as únicas variáveis atmosféricas a serem observadas.

Em estudos futuros poderiam ser exploradas discussões sobre o aproveitamento do aumento da radiação solar na região Nordeste do Brasil e a associação de tais resultados com a temperatura do ar, por exemplo. Além disso, é importante considerar os tipos de módulos fotovoltaicos e como eles se comportarão com o novo cenário climático. Ainda assim, os resultados encontrados são importantes para considerar um planejamento energético baseado na produção de energia fotovoltaica.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), projetos 308753/2021-6 e 424173/2021-2, e bolsas 142451/2018-5 e 481593/2020-00.

Referências

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Brasil ultrapassa marca de 10 GW em micro e mini-geração distribuída**, 2022. Disponível em <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2022/brasil-ultrapassa-marca-de-10-gw-em-micro-e-minigeracao-distribuida>, acesso em 09 de ago. 2024.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**, 2010. Disponível em [www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-EnergiaSolar\(3\).pdf.08/10/2020](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-EnergiaSolar(3).pdf.08/10/2020), acesso em 02 de out. 2021.
- ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. [doi](#)
- BARTÓK, B.; WILD, M.; FOLINI, D.; LUTHI, D.; KOTLARSKI, S.; *et al.* Projected changes in surface solar radiation in CMIP5 global climate models and in EURO-CORDEX regional climate models for Europe. *Climate Dynamics*, v. 49, n. 7-8, p. 2665-2683, 2017. [doi](#)
- BRAZIL. **Third National Communication of Brazil to the United Nations Framework Convention on Climate Change**. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2016. Disponível em <https://unfccc.int/resource/docs/natc/branc3es.pdf>, acesso em 27/8/2024.
- BURNETT, D.; BARBOUR, E.; HARRISON, G.P. The UK solar energy resource and the impact of climate change. *Renewable Energy*, v. 71, p. 333-343, 2014. [doi](#)
- CAVALCANTI, I.F.A.; FERREIRA, N.J.; SILVA, M.G.A.J.; DIAS, M.A.F.S. **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.
- COLLINS, W.J.; BELLOUIN, N.; DOUTRIAUX-BOUCHER, M.; GEDNEY, N.; HALLORAN, P.; *et al.* Development and evaluation of an earth-system model - HadGEM2. *Geoscientific Model Development*, v. 4, n. 4, p. 1051-1075, 2011. [doi](#)
- COSTA, R.L.; BAPTISTA, G.M.M.; GOMES, H.B.; SILVA, F.D.S.; ROCHA JÚNIOR, R.L.; *et al.* Analysis of climate extremes indices over northeast Brazil from 1961 to 2014. *Weather and Climate Extremes*, v. 28, p. 100254, 2020. [doi](#)
- CHOU, S.C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DEREZYNSKI, C.; PILOTTO, I.; *et al.* Evaluation of the Eta Simulations nested in three global climate models. *American Journal of Climate Change*, v. 3, p. 438-454, 2014a. Disponível em http://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx?PaperID=52887#.VakHg_IViko, acesso em 07 de ago. 2020. [doi](#)
- CHOU, S.C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DEREZYNSKI, C. Assessment of climate change over South America under RCP 4.5 and 8.5 downscaling scenarios. *American Journal of Climate Change*, v. 3, p. 512-527, 2014b. Disponível em: http://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx?PaperID=52877#.VakIh_IVikp, acesso em 07 de ago. 2020. [doi](#)
- DE JONG, P.; BARRETO, T.B.; TANAJURA, C.A.S.; KOULOUKOU, D.; ESQUERRE-OLIVEIRA, K.P.; *et al.* 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. [doi](#)
- EK, M.; MITCHELL, K.E.; LIN, Y.; ROGERS, E.; GRUNMANN, P.; *et al.* Implementation of Noah land surface model advances in the national centers for environmental prediction operational mesoscale Eta Model. *Journal of Geophysical Research*, v. 108, p. 8851, 2003. [doi](#)
- FELS, S.B.; SCHWARZKOPF, M.D. The simplified exchange approximation: a new method for radiative transfer calculations. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 32, p. 1475-1488, 1975.
- FERREIRA, A.; KUNH, S.S.; FAGNANI, K.C.; SOUZA, T.A.; TONEZER, C.; *et al.* Economic overview of the use and production of photovoltaic solar energy in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 81, p. 181-191, 2018. [doi](#)
- FOYO-MORENO, I.; ALADOS, I.; OLMO, F.J.; ALADOS-ARBOLEDAS, L. The influence of cloudiness on UV global irradiance (295-385 nm). *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 120, n. 1-4, p. 101-111, 2003. [doi](#)
- GUIMARÃES, S.O.; COSTA, A.A.; VASCONCELOS JÚNIOR, F.C.; SILVA, E.M.; SALES, D.C.; *et al.* Projeções de mudanças climáticas sobre o Nordeste brasileiro dos modelos do CMIP5 e do CORDEX. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 31, n. 3, p. 337-365, 2016. [doi](#)

- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Divisões regionais do Brasil**, 2017. Disponível em <https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>, acesso em 31 de ago. 2021.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Cidades e Estados**, 2019. Disponível em <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados.html>, acesso em 16 de set. 2021.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Cidades e Estados**, 2020. Disponível em <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados.html?view=municipio>, acesso em 16 de set. 2021.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Brazilian Earth System Model (BESM)**, 2019. Disponível em <https://www.ccst.inpe.br/publicacao/the-brazilian-earth-system-model-ocean-atmosphere-besm-oa-version-2-5-evaluation-of-its-cmip5-historical-simulation/>, acesso em 02 de mar. 2021.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Geneva: IPCC, 2023. Disponível em https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPC_C_AR6_SYR_LongerReport.pdf, acesso em 21 de mai. 2024.
- LACIS A.A.; HANSEN, J.A. Parameterization for the absorption of solar radiation in the Earth's atmosphere. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 31, p. 118-133, 1974.
- LEAL FILHO, W.; AZEITEIRO, U.; ALVES, F.; PACE, P.; MIFSUD, M.; *et al.* Reinvigorating the sustainable development research agenda: the role of the sustainable development goals (SDG). **International Journal of Sustainable Development and World Ecology**, v. 25, n. 2, p. 131-142, 2018. doi
- LIMA, F.J.L.; MARTINS, F.R.; COSTA, R.S.; GONÇALVES, A.R.; SANTOS, A.P.P.; *et al.* The seasonal variability and trends for the surface solar irradiation in northeastern region of Brazil. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 35, p. 335-346, 2019. doi
- LYRA, A.; TAVARES, P.; CHOU, S.C.; SUEIRO, G.; DERE-CZYNSKI, C.; *et al.* Climate change projections over three metropolitan regions in Southeast Brazil using the non-hydrostatic Eta regional climate model at 5-km resolution. **Theoretical and applied climatology**, v. 132, p. 663-682, 2018. doi
- MARENGO, J.A.; BERNASCONI, M. Regional differences in aridity/drought conditions over Northeast Brazil: present state and future projections. **Climatic Change**, v. 129, n. 1-2, p. 103-115, 2015. doi
- MARENGO, J.A.; TORRES, R.R.; ALVES, L.M. Drought in Northeast Brazil - past, present, and future. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 129, n. 3-4, p. 1189- 1200, 2017. doi
- MARTIN, G.M.; BELLOUIN, N.; COLLINS, W.J.; CULVERWELL, I.D.; HALLORAN, P.R.; *et al.* The HadGEM2 family of Met Office Unified Model climate configurations. **Geoscientific Model Development**, v. 4, n. 3, p. 723-757, 2011. doi
- MOHAJERI, N.; PERERA, A.T.D.; COCCOLO, S.; MOSCA, L.; LE GUEN, M.; *et al.* Integrating urban form and distributed energy systems: Assessment of sustainable development scenarios for a Swiss village to 2050. **Renewable Energy**, v. 143, p. 810-826, 2019. doi
- MOHAN, S.; BHASKARAN, P.K. Evaluation of CMIP5 climate model projections for surface wind speed over the Indian Ocean region. **Climate Dynamics**, v. 53, n. 9-10, p. 5415-5435, 2019. doi
- NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA). **The First Climate Model**, 2017. Disponível em http://celebrating200years.noaa.gov/breakthroughs/climate_model/, acesso em 20 de jul. 2022.
- NYASIMI, M.; PEAKE, L. **Review of targets for the sustainable development goals: the science perspective**. Paris: International Council for Science (ICSU), 2015.
- OHUNAKIN, O.S.; ADARAMOLA, M.S.; OYEWOLA, O.M.; MATTHEW, O.J.; FAGBENLE, R.O. The effect of climate change on solar radiation in Nigeria. **Solar Energy**, v. 116, p. 272-286, 2015. doi
- OLIVEIRA, A.C.L.; TÓTOLA, L.A.; LORENTZ, J.F.; SILVA, A.A.E.; ASSIS, L.R.; *et al.* Spatial analysis of energy indicators and proposition of alternative generation sources for the Brazilian territory. **Journal of Cleaner Production**, v. 356, p. 131894, 2022. doi
- OSCAR JUNIOR, A.; SILVA, W.L.; RUFFATO, V.; BARRETO, R.; FEEITAS, M. Evaluation of renewable energy vulnerability to climate change in Brazil: a case study of biofuels and solar energy. **Smart Grid and Renewable Energy**, v. 6, n. 8, p. 221-232, 2015. doi
- PRUDHOMME, C.; GIUNTOLI, I.; ROBINSON, E.L.; CLARK, D.B.; ARNELL, N.W.; *et al.* Hydrological droughts in the 21st century, hotspots and uncertainties from a global multimodel ensemble experiment. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 111, n. 9, p. 3262-3267, 2013. doi
- PYRINA, M.; HATZIANASTASSIOU, N.; MATSOUKAS, C.; FOTIADI, A. Cloud effects on the solar and thermal radiation budgets of the Mediterranean basin. **Atmospheric Research**, v. 152, p. 14-28, 2015. doi
- PAŠIČKO, R.; BRANKOVIĆ, C.; ŠIMIĆ, Z. Assessment of climate change impacts on energy generation from renewable sources in Croatia. **Renewable Energy**, v. 46, p. 224-231, 2012. doi
- QUEIROZ, A.R.; LIMA, L.M.M.; LIMA, J.W.M.; SILVA, B.C.; SCIANNI, L.A. Climate change impacts in the energy supply of the Brazilian hydro-dominant power system. **Renewable Energy**, v. 99, p. 379-389, 2016. doi
- RAVESTEIN, P.; SCHRIER, V.D.; HAARSMAN, R.; SCHEELE, R.; BROEK, V.D. Vulnerability of European intermittent renewable energy supply to climate change and climate variability. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 97, p. 497-508, 2018. doi
- RIABI, K.; RAO, S.; KREY, V.; CHO, C.; CHIRKOV, V.; *et al.* RCP 8.5-A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. **Climatic Change**, v. 109, n. 1, p. 33-57, 2011. doi
- RUFFATO-FERREIRA, V.; BARRETO, R.C.; OSCAR JÚNIOR, A.; SILVA, L.W.; VIANA, D.B.; *et al.* A foundation

- for the strategic long-term planning of the renewable energy sector in Brazil: hydroelectricity and wind energy in the face of climate change scenarios. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 72, p. 1124-1137, 2017. [doi](#)
- SANTOS, J.B.; VILLÁN, D.M.; CASTRILLO, A.M. Analysis and cloudiness influence on UV total irradiation. **International Journal of Climatology**, v. 31, p. 451-460, 2011. [doi](#)
- SANTOS, J.A.; ROCHINHA, C.; LIBERATO, M.L.R.; REYERS, M.; PINTO J.G. Projected changes in wind energy potentials over Iberia. **Renewable Energy**, v. 75, p. 68-80, 2015. [doi](#)
- SANTOS, F.; GÓMEZ-GESTEIRA, M.; CASTRO, M.; AÑEL, J.A.; CARVALHO, D.; *et al.* On the accuracy of CORDEX RCMs to project future winds over the Iberian Peninsula and surrounding ocean. **Applied Energy**, v. 228, p. 289-300, 2018. [doi](#)
- SOSPEDRA-ALFONSO, R.; MERRYFIELD, W. Influences of temperature and precipitation on historical and future snowpack variability over the Northern Hemisphere in the Second Generation Canadian Earth System Model. **Journal of Climate**, v. 30, p. 4633-4656, 2017. [doi](#)
- TANAJURA, C.A.S.; GENZ, F.; ARAÚJO, H.A. Mudanças climáticas e recursos hídricos na Bahia: validação da simulação do clima presente do HadRM3P e comparação com os cenários A2 e B2 para 2070-2100. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 3, p. 345-358, 2010. [doi](#)
- TAO, H.; EWEES, A.A.E.; AL-SULTANI, A.O.; BEYAZTAS, U.; HAMEED, M.M.; *et al.* Global solar radiation prediction over North Dakota using air temperature: development of novel hybrid intelligence model. **Energy Reports**, v. 7, p. 136-157, 2021. [doi](#)
- THOMSON, A.M.; CALVIN, K.V.; SMITH, S.J.; KYLE, G.P.; VOLKE, A.; *et al.* RCP4.5: a pathway for stabilization of radiative forcing by 2100. **Climatic Change**, v. 109, n. 1, p. 77-94, 2011. [doi](#)
- VEIGA, S.F.; NOBRE, P.; GIAROLLA, E.; CAPISTRANO, V.; BAPTISTA, M.; *et al.* The Brazilian Earth System Model ocean-atmosphere (BESM-OA) version 2.5: Evaluation of its CMIP5 historical simulation. **Geoscientific Model Development**, v. 12, n. 4, p. 1613-1642, 2019. [doi](#)
- VIRGILIO, G.D.; JI, F.; TAM, E.; NISHANT, N.; EVANS, J.P.; *et al.* Selecting CMIP6 GCMs for CORDEX dynamical downscaling: model performance, independence, and climate change signals. **Earth's Future**, v. 10, n. 4, p. 1-24, 2022. [doi](#)
- WACHSMUTH, J.; BLOHM, A.; GÖBLING-REISEMANN, S.; EICKEMEIER, T.; GASPER, R.; *et al.* How will renewable power generation be affected by climate change? The case of a metropolitan region in Northwest Germany. **Energy**, v. 58, p. 192-201, 2013. [doi](#)
- WANG, K.C.; DICKINSON, R.E.; WILD, M.; LIANG, S. Atmospheric impacts on climatic variability of surface incident solar radiation. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 12, n. 20, p. 9581-9592, 2012. [doi](#)
- WILD, M.; GRIESER, J.; SHÄR, C. Combined surface solar brightening and increasing greenhouse effect support recent intensification of the global land-based hydrological cycle. **Geophysical Research Letters**, v. 35, n. 17, p. 1-5, 2008. [doi](#)
- ZHANG, X.; LIANG, S.; WILD, M.; JIANG, B. Analysis of surface incident shortwave radiation from four satellite products. **Remote Sensing of Environment**, v. 165, p. 186-202, 2015. [doi](#)
- ZHANG, X.; LIANG, S.; WANG, G.; YAO, Y.; JIANG, B.; *et al.* Evaluation of the reanalysis surface incident shortwave radiation products from NCEP, ECMWF, GSFC, and JMA using satellite and surface observations. **Remote Sensing**, v. 8, n. 3, p. 225, 2016. [doi](#)
- ZHANG, F.; WANG, C.; XIE, G.; KONG, W.; JIN, S.; *et al.* Projection of global wind and solar resources over land in the 21st century. **Global Energy Interconnection**, v. 1, n. 4, p. 443-451, 2018. [doi](#)
- ZHAO, Q.; BLACK, T.L.; BALDWIN, M.E. Implementation of the cloud prediction scheme in the Eta Model at NCEP. **Weather and Forecasting**, v. 12, p. 697-712, 1997. [doi](#)
- ZULUNGA, C.F.; AVILA-DIAZ, A.; JUSTINO, F.B.; WILSON, A.B. Climatology and trends of downward shortwave radiation over Brazil. **Atmospheric Research**, v. 250, p. 105347, 2021. [doi](#)
- ZULUNGA, C.F.; AVILA-DIAZ, A.; JUSTINO, F.B.; MARTINS, F.R.; CERON, W.L. The climate change perspective of photovoltaic power potential in Brazil. **Renewable Energy**, v. 193, p. 1019-1031, 2022. [doi](#)



License information: This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (type CC-BY), which permits unrestricted use, distribution and reproduction in any medium, provided the original article is properly cited.