



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS



PAULA ROSE DE ARAÚJO SANTOS

**PROJEÇÕES DE ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS NA REGIÃO
NORDESTE DO BRASIL**

JOÃO PESSOA - PB
2021

PPGER / MESTRADO ACADÊMICO / N° XX

PAULA ROSE DE ARAÚJO SANTOS

**PROJEÇÕES DE ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS NA REGIÃO
NORDESTE DO BRASIL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Paraíba, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis, área de concentração em energias renováveis, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador
Dr. Raphael Abrahão, PhD

**JOÃO PESSOA - PB
2021**

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S237p Santos, Paula Rose de Araujo.

Projeções de alterações climáticas na região Nordeste do
Brasil / Paula Rose de Araujo Santos. - João Pessoa, 2021.
152 f. : il.

Orientação: Raphael Abrahão.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR.

1. Mudanças climáticas. 2. Modelo climático. 3.
Energias renováveis. 4. RCP4.5. 5. RCP8.5. I. Abrahão,
Raphael. II. Título.

UFPB/BC

CDU
551.583(043)

DEDICATÓRIA

A minha avó Creusa Viegas de Araújo que acompanhou o início, mas a quem não foi permitido ver o fim.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me mantido determinada e fiel a missão de concluir este projeto.

Sou grata a meus pais, Paulo Germano e Rosinete Araújo pelo apoio incondicional, confiança e por fazer dos meus anseios os seus. A minha irmã, Pollyana de Araújo e a minha sobrinha, Beatriz Araújo pelo carinho, parceria e paciência. Agradeço a todos os familiares que torceram pelo meu sucesso.

Agradeço aos amigos Luanna Batista, Anderson Guilhermino, Thatiane Nóbrega e Maísa Abílio por todo incentivo, confiança e compreensão pelos momentos em que coloquei meu projeto a frente deles. Em especial a minha amiga, Rafaela Lóz que mesmo distante se fez presente com toda sua atenção, apoio e positividade e há todos os que sempre torceram para o meu sucesso.

Aos meus colegas de curso que assim como eu enfrentaram os inúmeros desafios propostos por um mestrado e aos professores que contribuíram para o meu crescimento acadêmico desde a graduação ao mestrado, o meu muito obrigada.

Grata aos meus amigos do grupo climático, Louise Pereira, Susane Eterna, Wallyson Medeiros, Giusep Magno e Priscila Nilo, os quais foram unidos pelo propósito científico, mas escolheram permanecer juntos pela amizade e respeito. Obrigada pelo incentivo, amizade, colaboração e por todos os momentos de desconcentração que são tão importantes na caminhada.

Agradeço especialmente ao meu orientador, professor Raphael Abrahão por sua disponibilidade em compartilhar seu conhecimento e experiência. Agradeço não apenas por isso, mas também pela paciência, dedicação, compreensão, atenção e pela capacidade de guiar, corrigir e aconselhar de forma sempre gentil.

RESUMO

As alterações no clima podem ocorrer por consequências naturais ou antrópicas, todavia, como descrito no relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, as ações antrópicas são a principal causa do aquecimento global recente. Buscando compreender o comportamento climático foram desenvolvidos os modelos climáticos globais (GCM's) e os modelos climáticos regionais (RCM's). Nestes modelos são utilizados parâmetros de temperatura, precipitação, umidade relativa do ar, entre outros e com isso é possível projetar características climáticas futuras. O objetivo geral do trabalho foi projetar as condições climáticas futuras para a região Nordeste do Brasil, utilizando um conjunto de modelos climáticos globais e um modelo climático regional associados a dois cenários do IPCC (Painel Intergovernamental de Mudanças Climática). Para isso, primeiramente foi realizada uma revisão bibliográfica a partir de dois bancos de dados (*Science Direct* e *Web of Science*), utilizando um conjunto de palavras-chaves pré-definidas. Além disso, foram realizadas projeções climáticas para temperaturas média, máxima e mínima do ar, precipitação, umidade relativa do ar, velocidade do vento a 10 m e a 100 m, radiação de onda curta incidente à superfície e nebulosidade a partir de um conjunto de modelos climáticos globais (BESM, HadGEM2-ES, CanESM2 e MIROC5, apenas para precipitação) associados ao modelo climático regional Eta para o período de 2041-2069 e 2070-2099 com base nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 para a região Nordeste do Brasil. Os resultados evidenciaram a importância da utilização de mais de um modelo climático para as projeções, a fim de dar mais confiabilidade aos resultados. Além disso, os dados projetados para a região Nordeste indicaram aumentos na temperatura futura e redução na precipitação para a maior parte dos modelos. Esta diminuição também foi observada para a umidade relativa do ar. No caso da velocidade do vento, apesar de algumas localidades apresentarem possíveis reduções, o cenário de aumento é predominante na região Nordeste. Por fim, a radiação e a nebulosidade apresentaram resultados diferentes entre os modelos aplicados. Desta forma, é possível prever, por exemplo, se a região Nordeste do Brasil será uma área favorável para a produção energética renovável e se a população sofrerá com um cenário mais árido.

Palavras-Chave: Modelo climático, Mudanças climáticas, Energias renováveis, RCP4.5, RCP8.5.

ABSTRACT

Changes in climate can occur due to natural or man-made consequences, however, as described in the report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, human actions are the main cause of recent global warming. Seeking to understand climate behavior, global climate models (GCM's) and regional climate models (RCM's) were developed. In these models, parameters of temperature, precipitation, relative humidity of the air, among others are used, and with that it is possible to project future climatic characteristics. The general objective of the work was to project future climate conditions for the Northeast region of Brazil, using a set of global climate models and a regional climate model associated with two scenarios of the IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). For this, a bibliographic review was first carried out from two databases (Science Direct and Web of Science), using a set of pre-defined keywords. In addition, climatic projections were made for average, maximum and minimum air temperatures, precipitation, relative air humidity, wind speed at 10 m and 100 m, short-wave radiation incident to the surface and cloudiness from a set of climate models (BESM, HadGEM2-ES, CanESM2 and MIROC5, only for precipitation) associated with the Eta regional climate model for the period 2041-2069 and 2070-2099 based on the scenarios RCP4.5 and RCP8.5 for the Northeast region of Brazil. The results showed the importance of using more than one climate model for the projections, in order to give more reliability to the results. In addition, the data projected for the Northeast region indicated increases in future temperature and a reduction in precipitation for most models. This decrease was also observed for the relative humidity of the air. In the case of wind speed, although some locations show possible reductions, the scenario of increase is predominant in the Northeast region. Finally, radiation and cloudiness showed different results between the models applied. In this way, it is possible to predict, for example, whether the Northeast region of Brazil will be a favorable area for renewable energy production and whether the population will suffer from a more arid scenario.

Keywords: Climate model, Climate change, Renewable energy, RCP4.5, RCP8.5.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Porcentagem dos artigos publicados que discutiram potencial solar e/ou eólico futuro pelo mundo.	25
Figura 2.2: Porcentagem de artigos encontrados nos bancos de dados <i>Science Direct</i> e <i>Web of Science</i>	26
Figura 2.3: Porcentagem de artigos por quantidade de citações dos artigos analisados.....	26
Figura 2.4: Relação dos periódicos onde foram publicados os artigos científicos selecionados nos bancos de dados <i>Science Direct</i> e <i>Web of Science</i>	27
Figura 3.1: Classificação climática para a região Nordeste do Brasil de acordo com Köppen-Geiger. Fonte: Adaptado de Kottek, Grieser e Beck (2006) e Alvares <i>et al.</i> (2013).....	61
Figura 3.2: Anomalias para temperatura média anual nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 nos períodos de 2041-2069 e 2070-2099 a partir dos modelos Eta-BESM, Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 na região Nordeste do Brasil	66
Figura 3.3: Anomalias para temperatura mínima anual nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 nos períodos de 2041-2069 e 2070-2099 a partir dos modelos Eta-BESM, Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 na região Nordeste do Brasil	67
Figura 3.4: Anomalias para temperatura máxima anual nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 nos períodos de 2041-2069 e 2070-2099 a partir dos modelos Eta-BESM, Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 na região Nordeste do Brasil	68
Figura 3.5: Anomalias para umidade relativa do ar anual nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 nos períodos de 2041-2069 e 2070-2099 a partir dos modelos Eta-BESM, Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 na região Nordeste do Brasil	72
Figura 4.1: Mapa de localização da Região Nordeste do Brasil. Fonte: (IBGE, 2017)	84
Figura 4.2: Alterações percentuais projetadas para precipitação anual nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 nos períodos de 2041-2069 e 2070-2099 para os modelos Eta-BESM, Eta-HadGEM2-ES, Eta-CanESM2 e Eta-MIROC5 na região Nordeste do Brasil	89
Figura 5.1: Anomalias projetadas para a velocidade dos ventos a 10 m 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	106
Figura 5.2: Anomalias projetadas para a velocidade dos ventos a 100 m 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	107

Figura 5.3: Mapa de localização dos empreendimentos eólicos da Região Nordeste do Brasil. Adaptado de IBGE (2017); ANEEL (2020)110

Figura 6.1: 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.....124

Figura 6.2: 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 Brasil127

Figura 6.3: Usinas fotovoltaicas localizadas na Região Nordeste do Brasil. Adaptado de IBGE (2017); ANEEL (2020).....128

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Modelos climáticos utilizados para estudar o potencial solar e eólico diante das mudanças climáticas em algumas regiões no continente europeu	28
Tabela 2.2: Modelos climáticos utilizados para estudar o comportamento do potencial solar e eólico diante das mudanças climáticas em algumas áreas no continente americano.....	30
Tabela 2.3: Modelos climáticos utilizados para estudar o comportamento do potencial solar e eólico diante das mudanças climáticas em algumas áreas no continente africano	31
Tabela 2.4: Modelos climáticos utilizados para estudar o potencial solar diante das mudanças climáticas em algumas regiões no continente europeu	33
Tabela 2.5: Modelos climáticos utilizados para estudar o potencial solar diante das mudanças climáticas em algumas regiões nos continentes africano e asiático.....	35
Tabela 2.6: Modelos climáticos utilizados para estudar o potencial eólico em algumas regiões no continente europeu	36
Tabela 2.7: Modelos climáticos utilizados para estudar o potencial eólico diante das mudanças climáticas em algumas regiões no continente americano	45
Tabela 2.8: Modelos climáticos utilizados para estudar o potencial eólico diante das mudanças climáticas em algumas regiões nos continentes africano e asiático.....	49
Tabela 3.1: Média das anomalias das temperaturas do ar (°C) médias, máximas e mínimas anuais e desvio padrão (DP) quando comparados o período histórico com o período futuro de 2041-2069 e 2070-2099 nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 para a região Nordeste do Brasil.....	64
Tabela 3.2: Média e desvio padrão (DP) dos modelos Eta-BESM, Eta-HadGEM2-ES, Eta-CanESM2 e Eta-MIROC5 considerando os cenários RCP4.5 e RCP8.5 nos períodos de 2041-2069 e 2070-2099.....	73
Tabela 4.1: Média e desvio padrão (DP) dos modelos Eta-BESM, Eta-HadGEM2-ES, Eta-CanESM2 e Eta-MIROC5 considerando os cenários RCP4.5 e RCP8.5 nos períodos de 2041-2069 e 2070-2099	91
Tabela 5.1: Média e desvio padrão 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 velocidade dos ventos a 10 m.....	104
Tabela 5.2: Média e desvio padrão 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 velocidade dos ventos a 100 m.....	105

Tabela 5.3: Dados de potência dos parques eólicos em operação nos estados da região Nordeste do Brasil em 2020. Fonte: Aneel (2020)	108
Tabela 6.1: 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.....	123
Tabela 6.2: 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 nebulosidade.....	126
Tabela 7.1: Resumo dos resultados predominantes nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 a partir dos modelos empregados para os parâmetros avaliados	138
Tabela I.I: Dados sobre os níveis e componentes dos modelos climáticos globais empregados nas projeções para a região Nordeste do Brasil	154

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

A1B - Cenário de Emissão Média
A2 - Antigo Cenário global de mudanças climáticas do IPCC
Abeeolica - Associação Brasileira de Energia Eólica
Af - Tropical úmido
Am - Tropical de monção
Aneel - Agência Nacional de Energia Elétrica
AOGCMs - Modelos de Circulação Geral Atmosfera-Oceano
As - Tropical com verão seco
AW - Tropical com inverno seco
AWE-GEN - Gerador Meteorológico Avançado
B1 - Cenário de Baixa Emissão
B2 - Cenário de Baixa Emissão
BCM - Modelo Climático de Bergen
BESM - Modelo Brasileiro do Sistema Terrestre
Bs - Semiárido
CanESM2 - Modelo de Previsão e Pesquisa Meteorológica
CCSM - Modelo de Sistema Climático Comunitário
CFSR - Reanálise do Sistema de Previsão Climática
CGCM2.3.2 - Modelo Climático Global
CGCM3 - Modelo Climático Global Acoplado de Terceira Geração
CCLM - Modelo Climático Regional
CM2.1 - Modelo Climático Global
CMIP5 - Modelo Acoplado da Fase 5
CNRM-CM5 - Modelo Climático Global
CO₂ - Dióxido de Carbono
CORDEX - Experiência regional Coordenada de Redução do Clima
COSMO-CCLM - Modelo Climático
COSMO-CLM - Modelo Climático Regional
CPTEC - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
DP - Desvio padrão

EC-Earth - Modelo de Sistema Terrestre da Comunidade Europeia
ECHAM4/OPYC3- Modelo acoplado
ECHAM5 - Modelo Climático Global
ECHAM5/MPI-OM - Modelo Climático Global
ECHAM5-MPIDM - Modelo Climático Global
ECMWF - Centro Europeu de Previsão Meteorológica de Médio Prazo
ERA-40 - Modelo Climático
ESM - Modelos do Sistema Terrestre
ESM2G - Associação Nacional Oceânica e Atmosférica: Laboratório de Dinâmica de Fluidos Geofísicos e Sistema Terrestre Modelo 2
Eta - Modelo Climático Regional
EUA - Estados Unidos da América
EURO-CORDEX - Experiência Regional Coordenada de Redução do Clima - Domínio Europeu
GCM - Modelo Climático Global
GFDL - Modelo Climático Global
GFDL-CM2.1 - Modelo Climático Global
GIS- S-ER - Modelo Climático Global
HadAM3H - Modelo Climático Global
HADCM - Modelo Climático Global
HadCM3 - Versão 3 do Hadley Center Coupled Model
HadGEM2-ES - Hadley Global Environment Model 2 - Sistema Terra
HIRLAM - Modelo de Área Limitada de Alta Resolução
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICTP-RegCM3 - Modelo Climático Regional
INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC - Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
IPSL-CM5A-MR - Modelo Climático Global
KW - Kilowatts
MERRA-2 - Conjunto de dados de reanálise
MIROC5 - Modelo de Pesquisa Interdisciplinar em Clima
MOM4 - *Modular Ocean Model 4*
MOSCCP - Modelo de Programação Estocástica
MPI-ESM-LR - Modelo Climático Global

MRI-CGCM2.3.2 - Modelo Climático Global

MW - Megawatt

NARCCAP - Conjunto de Experimentos Numéricos

NARR - Conjunto de dados de reanálise

NCEI-CMDC - Conjunto de Dados

NCEP - Centros Nacionais de Previsão Ambiental

NOAA - Administração Oceânica e Atmosférica Nacional

ODS - Objetivos do desenvolvimento sustentável

PCM - Modelo Climático Paralelo

ppm - Partes por milhão

PRECIS - Fornecimento de impactos climáticos regionais para estudos

Qgis - Software livre

RAMS - Sistema de Modelagem Atmosférica Regional

RCA4 - Modelo atmosférico regional do Rossby Center, RCA4

RCM - Modelo Climático Regional

RCM3 - Modelo Climático Regional Versão 3

RCP - Caminhos Representativos de Concentração

RegCM - Sistema de Modelo de Clima Regional

RegCM4 - Sistema de Modelo de Clima Regional

REMO - Modelo Climático Regional

SSIB - Modelo Simples da Biosfera

TWh - Terawatt-hora

VR-CESM - Modelo de Sistema Terrestre Comunitário de Resolução Variável

WWEA - Associação Mundial de Energia Eólica

WRF - Modelo de Previsão e Pesquisa Meteorológica

WRFG - Modelo de Previsão e Pesquisa do Clima

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO GERAL	17
1.1. OBJETIVOS.....	19
1.1.1. Objetivo Geral.....	19
1.1.2. Objetivos Específicos.....	19
CAPÍTULO 2 – INFLUÊNCIA DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NAS ENERGIAS RENOVÁVEIS SOLAR E EÓLICA: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
Resumo.....	21
Abstract.....	21
2.1. Introdução	22
2.2. Metodologia	23
2.3. Resultados e discussão	24
2.3.1. Mudanças climáticas e energias solar e eólica.....	24
2.3.2. Estudos que abordaram o potencial solar e eólico	28
2.3.2.1. Resultados para o continente europeu	28
2.3.2.2. Resultados para o continente americano	30
2.3.2.3. Resultados para o continente africano	31
2.3.3. Resultados que discutiram o potencial solar fotovoltaico	33
2.3.3.1. Resultados para o continente europeu	33
2.3.3.2. Resultados para os continentes africano e asiático	35
2.3.4. Resultados que discutiram o potencial eólico	36
2.3.4.1. Resultados para o continente europeu	36
2.3.4.2. Resultados para o continente americano	45
2.3.4.3. Resultados para os continentes africano e asiático.....	49
2.4. Conclusão.....	51
2.5. Referências.....	52
CAPÍTULO 3 – PROJEÇÕES CLIMÁTICAS DE TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA DO AR PARA A REGIÃO NORDESTE DO BRASIL A PARTIR DE UM CONJUNTO DE MODELOS CLIMÁTICOS.....	58
Resumo.....	58
Abstract.....	58
3.1. Introdução	59
3.2. Metodologia	60
3.2.1. Caracterização da área de estudo	60
3.2.2. Dados dos modelos climáticos	61
3.3. Resultados e Discussão	63
3.3.1. Temperatura média, mínima e máxima do ar.....	63
3.3.2. Umidade relativa do ar	71
3.3.3. Consequências potenciais.....	73
3.4. Conclusão.....	74
3.5. Referências.....	75

CAPÍTULO 4 – PROJEÇÕES DE PRECIPITAÇÃO PARA A REGIÃO NORDESTE DO BRASIL EMPREGANDO UM CONJUNTO COM QUATRO MODELOS CLIMÁTICOS GLOBAIS ASSOCIADOS AO MODELO REGIONAL ETA.....	82
Resumo.....	82
Abstract.....	82
4.1. Introdução	83
4.2. Metodologia	84
4.2.1. Caracterização da área.....	84
4.2.2. Dados das projeções climáticas.....	85
4.3. Resultados e Discussão	86
4.3.1. Precipitação	86
4.3.2. Possíveis consequências das mudanças projetadas pelos modelos	92
4.4. Conclusão.....	93
4.5. Referências.....	94
CAPITULO 5 – PROJEÇÕES DE VELOCIDADE DOS VENTOS PARA A REGIÃO NORDESTE DO BRASIL A PARTIR DA APLICAÇÃO DE UM CONJUNTO DE MODELOS CLIMÁTICOS.....	99
Resumo.....	99
Abstract.....	99
5.1. Introdução	100
5.2. Metodologia	101
5.2.1. Caracterização da área de estudo	101
5.2.2. Dados dos modelos climáticos	102
5.3. Resultados e discussão	103
5.4. Conclusão.....	111
5.5. Referências.....	112
CAPITULO 6 – PROJEÇÕES DE RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE À SUPERFÍCIE E NEBULOSIDADE PARA A REGIÃO NORDESTE DO BRASIL APLICANDO UM CONJUNTO DE MODELOS CLIMÁTICOS.....	117
Resumo.....	117
Abstract.....	117
6.1. Introdução	118
6.2. Metodologia	119
6.2.1. Caracterização da área de estudo	119
6.2.2. Projeções climáticas	120
6.3. Resultados e discussão	121
6.3.1. Radiação de onda curta incidente à superfície	121
6.3.2. Nebulosidade.....	125
6.4. Conclusão.....	129
6.5. Referências.....	130
CAPÍTULO 7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	137
REFERÊNCIAS DE TODA DISSERTAÇÃO.....	140
ANEXO I – Informações adicionais sobre os modelos climáticos globais utilizados.....	154

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO GERAL

O Relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) publicado em 2019 evidenciou que a temperatura do ar na Terra continua se elevando e isso poderá gerar o aumento da frequência das secas em distintas regiões pelo mundo, incluindo a Amazônia e o Nordeste do Brasil (JIA *et al.*, 2019).

Os constantes efeitos das alterações climáticas geraram a necessidade e a preocupação de compreender como os vários elementos climáticos se comportarão diante de uma nova perspectiva do clima. Para realizar esses estudos é necessária a aplicação de modelos climáticos, os quais são a principal ferramenta utilizada para se projetar cenários de mudanças climáticas. Esses modelos são baseados nas leis da física e equações matemáticas a fim de compreender os mecanismos do sistema terrestre (CARBON BRIEF, 2018). O primeiro modelo climático foi desenvolvido no final dos anos 60 em Princeton-EUA, no Laboratório de Dinâmica de Fluidos Geofísicos da NOAA (NOAA, 2017). O modelo relacionava os processos oceânicos e atmosféricos que influenciam no clima, além da relação entre os elementos naturais (NOAA, 2017).

São os modelos climáticos globais e regionais que projetam as condições climáticas futuras, utilizando os parâmetros de temperatura do ar, precipitação, umidade, entre outros (QUEIROZ *et al.*, 2016) associados aos chamados Caminhos Representativos de Concentração (RCP), os quais são utilizados no relatório do IPCC. Estes são divididos em RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 e RCP8.5, os quais vão do cenário mais otimista até o mais pessimista, respectivamente (MÜLLER *et al.*, 2019).

Estudos aplicando modelos climáticos indicaram aumento da temperatura do ar em diferentes áreas pelo mundo. Por exemplo, na Península Ibérica projeções de aumento foram observados por Almazroui *et al.* (2017); Matthew e Ohunakin (2017) verificaram aumento para a Nigéria; Jacob *et al.* (2014) perceberam elevações da temperatura para a Europa; Byun e Hamlet (2018) para os Estados Unidos e Canadá e De Jong *et al.* (2019) para o Brasil, ratificando os resultados apresentados nos relatórios do IPCC.

Além da temperatura do ar, a precipitação, a umidade relativa do ar, as condições de ventos e radiação também poderão ser alteradas devido às mudanças climáticas. Para esses parâmetros ocorre uma notável variação a depender das regiões do planeta. No

Brasil, por exemplo, De Marengo e Bernasconi (2015) identificaram redução da precipitação na Amazônia e no Nordeste. Por sua vez, Ruffato-Ferreira *et al.* (2017) e Lucena *et al.* (2009) destacaram que a redução da precipitação tornará a situação futura da Bacia do Rio São Francisco mais crítica. Para a umidade relativa do ar autores como Marengo e Bernasconi (2015), Cavalcanti Junior *et al.* (2016) e Silva *et al.* (2019) projetaram reduções para algumas áreas no Nordeste do Brasil.

Dessa forma, observa-se que as alterações climáticas poderão causar mudanças relevantes em diversos parâmetros climáticos em diferentes regiões pelo mundo, com consequências que ainda não são inteiramente compreendidas. A partir da realização do prognóstico será possível prever os impactos na sociedade, na saúde, e na produção energética e alimentar, além de possibilitar a criação de políticas para adaptação e mitigação dos impactos das mudanças no clima.

A presente dissertação está estruturada da seguinte forma:

- Capítulo 1: Apresenta a forma como está organizado o trabalho, com a introdução e os objetivos;
- Capítulo 2: Traz o artigo de revisão intitulado Influência das mudanças climáticas nas energias renováveis solar e eólica: Revisão bibliográfica;
- Capítulo 3: Apresenta o estudo a respeito da temperatura média, máxima e mínima do ar e umidade relativa do ar denominado de: Projeções climáticas de temperatura e umidade relativa do ar para a região Nordeste do Brasil a partir de um conjunto de modelos climáticos;
- Capítulo 4: Apresenta o estudo sobre a precipitação nomeado de: Projeções de precipitação para a região Nordeste do Brasil empregando um conjunto com quatro modelos climáticos globais associados ao modelo regional Eta;
- Capítulo 5: Traz projeções a respeito da velocidade dos ventos a 10 m e a 100 m no Nordeste do Brasil intitulado de: Projeções de velocidade dos ventos a 10 m e a 100 m para a região Nordeste do Brasil a partir da aplicação de um conjunto de Modelos climáticos;
- Capítulo 6: Apresenta o estudo sobre a radiação solar de onda curta incidente à superfície e a nebulosidade no Nordeste brasileiro nomeado de:

Projeções de radiação solar incidente à superfície e nebulosidade para a região Nordeste do Brasil aplicando um conjunto de modelos climáticos;

- Capítulo 7: Neste capítulo, encontra-se as considerações finais destacando os principais pontos de todos os capítulos anteriormente apresentados.

Por fim, as referências de toda a dissertação.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

O objetivo geral do trabalho foi avaliar as mudanças nos elementos climáticos frente as alterações climáticas para a região Nordeste do Brasil, utilizando um conjunto de modelos climáticos globais (BESM, HadGEM2-ES, CanESM2 e MIROC5) e um modelo climático regional (Eta) associados a dois cenários do IPCC (RCP4.5 e RCP8.5) a partir de uma série de parâmetros climáticos para o período histórico de 1961-1990 e os períodos futuros de 2041-2069 e 2070-2099.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Entender, por meio de trabalhos já publicados, como as alterações climáticas futuras poderão afetar a geração de energia a partir das fontes renováveis solar e eólica;
- Investigar as alterações nas condições de temperatura e umidade relativa do ar aplicando um conjunto de modelos climáticos (Eta-BESM, Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2) para a região Nordeste do Brasil;
- Verificar os impactos das projeções do clima na variável de precipitação utilizando quatro modelos climáticos globais associados ao modelo climático regional Eta para a região Nordeste do Brasil;
- Averiguar os impactos na velocidade dos ventos a 10 m e as 100 m aplicando um conjunto de três modelos climáticos globais associados ao modelo climático regional Eta para a região Nordeste do Brasil;

- Analisar as mudanças futuras nas condições de radiação solar de onda curta incidente à superfície e nebulosidade, aplicando três modelos climáticos globais e o modelo climático regional Eta para a região Nordeste do Brasil.

CAPÍTULO 2

INFLUÊNCIA DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NAS ENERGIAS RENOVÁVEIS SOLAR E EÓLICA: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Resumo

A preocupação em reduzir a emissão de gases intensificadores do efeito estufa gera a necessidade de encontrar alternativas para geração de energia que não utilizem combustíveis fósseis e emitam menos CO₂ para a atmosfera. A utilização das energias solar e eólica são alternativas para geração de energia através de uma fonte limpa. Por outro lado, as energias renováveis são fortemente susceptíveis à variabilidade climática. A irradiação solar e a velocidade dos ventos, por exemplo, podem sofrer alterações devido às mudanças no clima. Sendo assim, o planejamento energético deve levar em consideração a influência que o cenário climático futuro causará à produção energética renovável. Os modelos climáticos globais (GCM's) e os modelos climáticos regionais (RCM's) levam em conta uma série de parâmetros, como a intensidade e velocidade dos ventos, precipitação, radiação solar, comportamento das nuvens e aerossóis para projetarem as condições climáticas temporais futuras. A utilização dos resultados de diferentes GCM's e RCM's assegura maior confiabilidade nos dados gerados. O presente trabalho teve o objetivo de realizar uma revisão bibliográfica de trabalhos referentes a utilização de modelos climáticos globais e regionais que simulassem os impactos das mudanças climáticas nas energias renováveis solar e eólica publicados em periódicos internacionais. A pesquisa foi realizada nos bancos de dados *Science Direct* e *Web of Science - Coleção Principal (Clarivate Analytics)*, empregando-se um conjunto de palavras-chave pré-determinadas. A partir da análise dos resumos foram selecionados apenas trabalhos referentes às fontes energéticas renováveis solar e eólica frente às transformações no clima. A partir dos resultados foi possível compreender como a geração energética renovável através do sol e dos ventos será afetada diante das mudanças climáticas.

Palavras-chave: Modelos climáticos, fontes renováveis, CGM, RCM.

Abstract

The concern to reduce the emission of gases that intensify the greenhouse effect generates the need to find alternatives for energy generation that do not use fossil fuels and emit less CO₂ into the atmosphere. The use of solar and wind energy are alternatives for generating energy through a clean source. On the other hand, renewable energies are highly susceptible to climatic variability. Solar radiation and wind speed, for example, can change due to changes in the climate. Therefore, energy planning must take into account the influence that the future climate scenario will have on renewable energy production. Global climate models (GCM's) and regional climate models (RCM's) take into account a number of parameters, such as wind speed and intensity, precipitation, solar radiation, cloud behavior and aerosols to project future weather conditions. The use of the results of different GCM's and RCM's ensures greater reliability in the data generated. The present work aimed to carry out a bibliographic review of works referring to the use of global and

regional climate models that simulate the impacts of climate change on renewable solar and wind energy published in international journals. The research was carried out in the databases Science Direct and Web of Science - Main Collection (Clarivate Analytics), using a set of predetermined keywords. From the analysis of the abstracts, only works referring to renewable solar and wind energy sources were selected in the face of changes in the climate. From the results it was possible to understand how renewable energy generation through the sun and winds will be affected in the face of climate change.

Keywords: Climate models, renewable sources, CGM, RCM.

2.1. Introdução

As mudanças climáticas são percebidas devido a modificações nas características climáticas por um longo período (décadas ou mais) e podem ocorrer em razão de processos naturais e antropogênicos (IPCC, 2014). O relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) publicado em 2019 destacou o aumento da temperatura terrestre e ressaltou o crescimento da frequência das secas na Amazônia, na região Nordeste do Brasil, na costa leste dos Estados Unidos, na Patagônia, em grande parte da África, em regiões do Mediterrâneo e no nordeste da China (JIA *et al.*, 2019).

As mudanças climáticas geram alterações nos padrões climáticos, como na temperatura do ar, no regime de chuvas (MARENGO *et al.*, 2012; JACOB *et al.*, 2014; MARENGO; BERNASCONI, 2015; SHEN *et al.*, 2018; MATTHEW; OHUNAKIN, 2017; WOO *et al.*, 2018), na velocidade dos ventos, na radiação e em outros parâmetros (LIZUMA *et al.*, 2013; KOLETIS *et al.*, 2016; BARTÓK *et al.*, 2017, DE JONG *et al.*, 2019). Como consequência, podem ser afetados a saúde humana, a economia, a produção alimentar, o abastecimento de água, entre outras atividades humanas (NYASIMI, 2015).

Apesar de ser afetada diretamente pelas mudanças no clima, a utilização das fontes renováveis para a produção energética é uma forma de mitigar os impactos climáticos (BURNETT; BARBOUR; HARRISON, 2014; NYASIMI, 2015). As energias solar e eólica, por exemplo, já são amplamente utilizadas para geração de energia, contudo, a variabilidade no clima pode alterar o potencial solar e o eólico causando incertezas na produção energética (RAVESTAIN *et al.*, 2018).

Os modelos climáticos globais (GCM's) e os modelos climáticos regionais (RCM's) são ferramentas utilizadas para simular as condições climáticas. Os modelos são capazes de simular a temperatura, a velocidade dos ventos, a precipitação e outros parâmetros climáticos para diferentes áreas do planeta e diferentes períodos temporais

(PAŠIČKO; BRANKOVIĆ; ŠIMIĆ, 2012; QUEIROZ *et al.*, 2016). No entanto, é preciso ficar atento às incertezas que podem ser geradas na modelagem climática (KOLETSIS *et al.*, 2016). Para diminuí-las e gerar dados mais confiáveis deve-se, entre outras medidas, considerar resultados de distintos modelos (PAŠIČKO; BRANKOVIĆ; ŠIMIĆ, 2012).

O primeiro modelo de circulação geral foi desenvolvido no Laboratório de Dinâmica dos Fluidos Geofísicos da NOAA em Princeton, Estados Unidos, no final da década de 1960. O modelo combinava os processos oceânicos e atmosféricos e foi capaz de prever como fatores climáticos naturais influenciavam nas mudanças climáticas (NOAA, 2017). Segundo o NOAA (2017), os modelos climáticos são ferramentas baseadas nas leis da física, do movimento dos fluidos e da química. Além disso, utilizam de fórmulas matemáticas a fim de reproduzir os processos físicos e químicos que impulsionam o clima terrestre.

Diante do exposto, percebe-se a necessidade e a importância de entender o comportamento climático aplicando distintas perspectivas a fim de realizar um planejamento energético eficaz para a utilização das energias solar e eólica (QUEIROZ *et al.*, 2016). Este trabalho apresenta uma sequência de estudos em que foram aplicados modelos climáticos globais e/ou regionais para entender os impactos gerados pelas mudanças climáticas nas energias renováveis solar e eólica. O propósito foi entender como as alterações climáticas podem afetar a geração de energia a partir dessas fontes renováveis e a importância de conhecer o cenário energético renovável futuro para a adequada utilização dessas fontes.

2.2. Metodologia

A pesquisa foi realizada utilizando o banco de dados *Web of Science* - Coleção Principal (*Clarivate Analytics*) e *Science Direct*. Primeiramente, empregaram-se as palavras-chave: “*renewable energy*”, “*climate model*”, “*climate change*”, “*solar energy*” e “*wind energy*”. Como a pesquisa tinha por objetivo que todas as palavras-chave ocorressem de forma simultânea utilizou-se o conectivo “*and*”.

Para o *Science Direct* obtiveram-se 210 resultados e ao filtrar-se apenas por artigos publicados em periódicos restaram 134 artigos. Desse número 13 foram selecionados, pois foram aqueles que relacionavam as mudanças climáticas com as energias renováveis. Para o *Web of Science* - Coleção Principal (*Clarivate Analytics*) 03 resultados foram

apresentados. Em seguida, filtrou-se os publicados em periódicos restando 02 artigos. Contudo, um já havia sido encontrado no *Science Direct*. Sendo assim, apenas um foi utilizado.

Tendo em vista a quantidade de artigos selecionados, optou-se por utilizar o mesmo grupo de palavras-chave, no entanto, excluindo o termo “*wind energy*”, com o intuito de focar apenas nos artigos relacionados à energia solar. Neste caso, para o *Science Direct* foram obtidos 294 artigos e deste número 06 seguiam a temática pretendida. No caso do *Web of Science - Coleção Principal (Clarivate Analytics)* foram encontrados 05 resultados e 04 eram artigos publicados em periódicos. Dos quatro trabalhos, apenas um foi utilizado, já que dois já haviam sido encontrados na pesquisa anterior e o outro fugia do objetivo da pesquisa.

Para finalizar, utilizou-se o mesmo grupo de palavras-chave inicial, só que desta vez excluindo-se o palavra-chave “*solar energy*”. Para o *Science Direct* foram encontrados 286 artigos, mas apenas 25 combinavam com o objetivo da pesquisa. No *Web of Science - Coleção Principal (Clarivate Analytics)* foram encontrados 16 resultados e destes, 12 eram artigos. Neste caso, 04 já haviam sido selecionados anteriormente e o outro fugia da temática do artigo restando 07 trabalhos.

A pesquisa foi realizada para o período entre 01 de janeiro de 1995 e 01 de dezembro de 2020, resultando em 53 artigos dentro da temática pretendida.

2.3. Resultados e discussão

2.3.1. Mudanças climáticas e energias solar e eólica

A partir da análise dos 53 artigos selecionados observou-se que os trabalhos que analisaram a influência das mudanças climáticas nas energias solar e eólica foram majoritariamente realizados nos continentes europeu e americano, os quais somam 77,8% dos artigos encontrados (Figura 2.1). Outro dado importante refere-se ao potencial eólico o qual foi estudado em quatro continentes (Europa, América, África, Ásia). Porém, no continente africano, diferente do que foi evidenciando para os outros continentes, o potencial solar foi o mais estudado (Figura 2.1).

Dos artigos encontrados, dois realizaram projeções para diversas regiões pelo mundo. O artigo de Zou *et al.* (2019) concentrou-se em discutir a respeito da energia solar

fotovoltaica em áreas que abrangeram o Japão, China, África, Oriente, Índia, Ásia, Austrália, Europa, América do Norte, América Central e América do Sul. No estudo de Zhang *et al.* (2018), além do potencial solar os autores também projetaram dados sobre o potencial eólico futuro em distintas regiões pelo mundo (nos continentes europeu, americano, africano e asiático e também na Austrália).

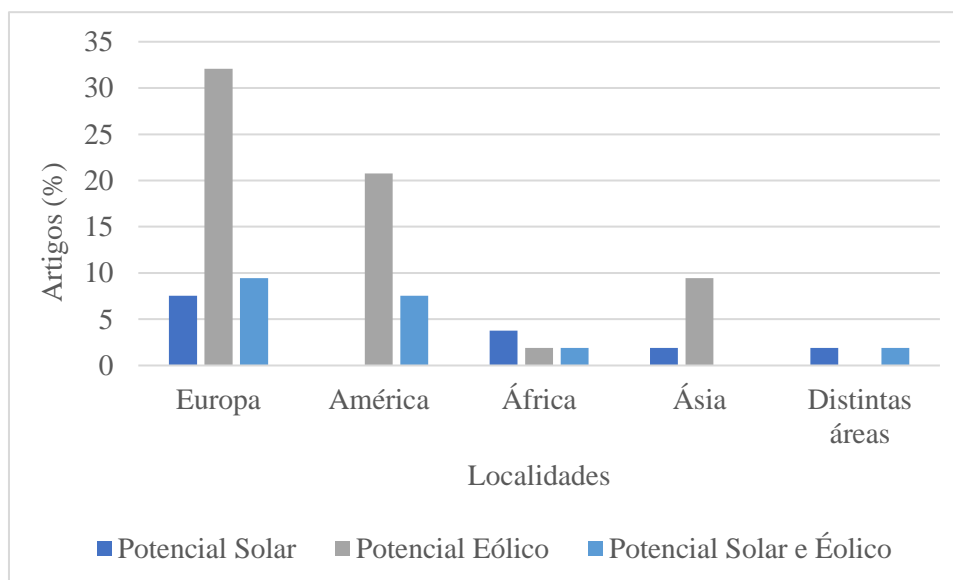


Figura 2.1: Porcentagem dos artigos publicados que discutiram potencial solar e/ou eólico futuro pelo mundo.

Na realização da pesquisa optou-se por utilizar dois bancos de dados, o *Science Direct* e o *Web of Science*. Os resultados mostraram que a maior parte dos trabalhos foram obtidos utilizando o *Science Direct*, o que corresponde a 83% dos estudos encontrados (Figura 2.2).

Apenas 4 artigos foram comuns aos dois bancos de dados, destes, dois tratavam sobre o potencial eólico, o de Santos *et al.* (2015) e o de Johnson e Erhardt (2016). Além do potencial eólico, os trabalhos de Ravestein *et al.* (2018) e De Jong *et al.* (2019) também realizaram projeções a respeito do potencial solar futuro.

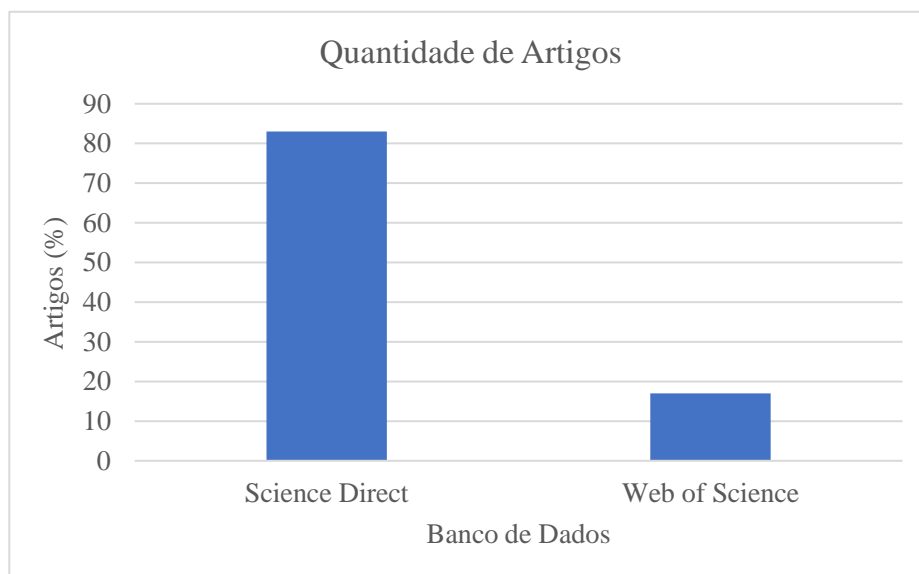


Figura 2.2: Porcentagem de artigos encontrados nos bancos de dados *Science Direct* e *Web of Science*.

A Figura 2.3 apresenta a quantidade de citações dos artigos utilizados. Observa-se que apenas 4%, o que corresponde a 2 artigos, foram citados mais de 110 vezes. O primeiro, é o artigo de Sailor, Smith e Hart (2008) e o segundo é o de Pryor, Barthelmie e Kjellström (2005) com 110 e 127 citações respectivamente, ambos discutiram a respeito do potencial eólico no continente europeu.

A pesquisa mostrou que 9% dos trabalhos não foram citados, no entanto, destaca-se que destes, três foram publicados em 2020 e apenas um era um pouco mais antigo, de 2018.

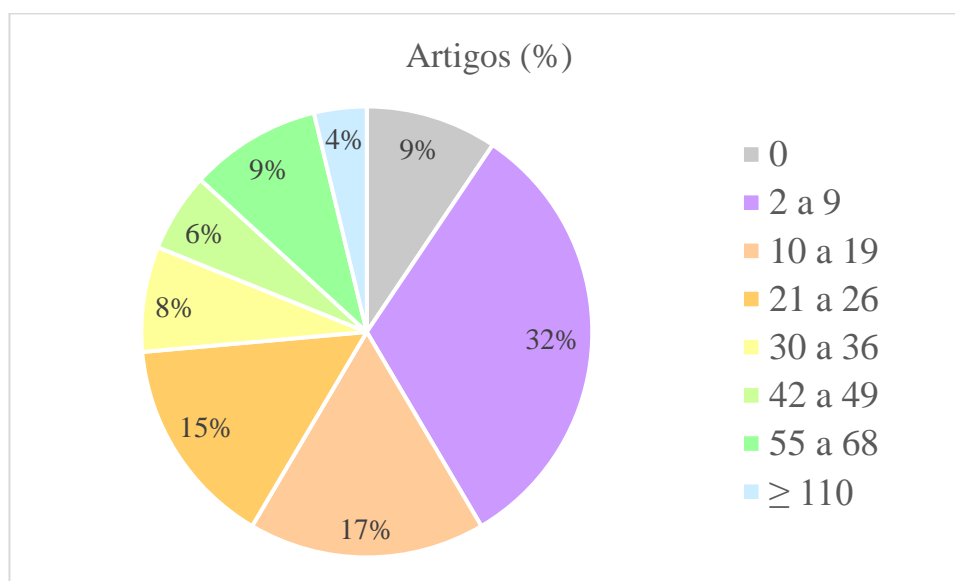


Figura 2.3: Porcentagem de artigos por quantidade de citações dos artigos analisados.

A Figura 2.4 traz os periódicos em que os artigos foram publicados. A *Renewable Energy* se destaca por ter sido aquela em que 38% dos estudos analisados foram publicados, seguido pela *Renewable and Sustainable Energy Reviews* com 13% das publicações e a *Applied Energy* com 11%.

As revistas com o maior número de publicações foram selecionadas a partir da página da *Science Direct*, a qual é operada pela editora holandesa *Elsevier*. Dos 16 periódicos selecionados apenas 6 não faziam parte dessa editora (Figura 2.4).

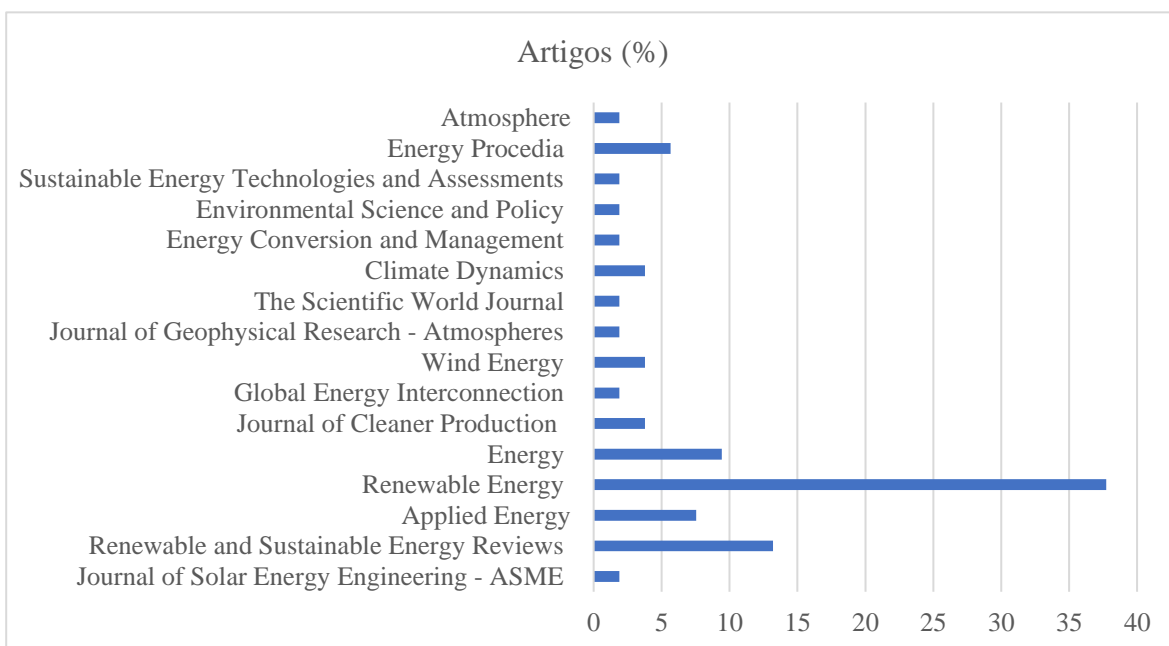


Figura 2.4: Relação dos periódicos onde foram publicados os artigos científicos selecionados nos bancos de dados *Science Direct* e *Web of Science*.

2.3.2. Estudos que abordaram o potencial solar e eólico

2.3.2.1. Resultados para o continente europeu

Na Tabela 2.1 podem ser observados os artigos que discutiram a respeito do potencial solar e eólico e quais os modelos aplicados para realizar as projeções climáticas.

Tabela 2.1: Modelos climáticos utilizados para estudar o potencial solar e eólico diante das mudanças climáticas em algumas regiões no continente europeu.

Autor(es)	Modelo	Local
Ravestein <i>et al.</i> (2018)	EC-EARTH	Atlântico Norte e Europa
Schlott <i>et al.</i> (2018)	Três membros do conjunto do projeto EURO-CORDEX	Europa
Wachsmuth <i>et al.</i> (2013)	Modelos climáticos regionais CLM e REMO	Região Metropolitana do Noroeste da Alemanha
Pašičko, Brankovi e Šimić (2012)	GCM: ECHAM5-MPIDM RCM: RegCM	Croácia

Ravestein *et al.* (2018) e Wachsmuth *et al.* (2013) avaliaram a situação futura das energias eólica e solar, sendo o primeiro para o Atlântico Norte e a Europa e o segundo para o Noroeste da Alemanha devido às mudanças climáticas.

Ravestein *et al.* (2018) encontraram que as mudanças no clima poderão causar influência negativa na produção de energia eólica e fotovoltaica, entretanto, a Oscilação do Atlântico Norte (NAO) pode evitar que as interferências sejam significativas. Os resultados ainda indicaram que as mudanças climáticas afetarão os rendimentos potenciais de energia eólica e fotovoltaica em todas as regiões estudadas.

Os resultados de Wachsmuth *et al.* (2013) para o Noroeste da Alemanha, no período de 2036-2065 e 2071-2100, indicaram o aumento da velocidade dos ventos no inverno e a redução no verão. Os autores descreveram que a geração de energia eólica atingirá o pico no outono de 2050 e de forma mais significativa no inverno no final do século XXI devido à elevação da velocidade dos ventos nesse período. Com relação a energia solar, o pico sazonal de radiação aumentará na região estudada, no entanto, a produção de energia solar não será significativamente afetada. Observa-se que Moemken *et al.* (2018) identificaram um aumento do potencial eólico em parte da Alemanha no inverno para o período de 2071-2100.

Schlott *et al.* (2018) avaliaram o comportamento solar, eólico e hídrico para a Europa e as consequências energéticas para os custos. Pašičko, Brankovi e Šimić (2012) investigaram como se comportará a produção energética por meio das fontes solar, eólica e hidrelétrica diante das mudanças climáticas na Croácia. Os resultados encontrados por Schlott *et al.* (2018) demonstraram que o potencial solar fotovoltaico terá um comportamento mais favorável e permanente até o final do século XXI na região norte da Europa, contrário ao que ocorrerá com o potencial eólico, nesse caso, o sul da Europa terá um comportamento eólico mais favorável até o final do século XXI.

De acordo com os resultados projetados por Pašičko, Brankovi e Šimić (2012) na Croácia para o período de 2011-2040 e 2041-2070, os autores evidenciaram o aumento na velocidade média do vento, e com isso, o provável aumento da produção energética a partir das usinas eólicas. O aumento da velocidade média dos ventos será consideravelmente maior no período de 2041-2070 quando comparadas com o período de 2011-2040, sendo de 35% a 60% na área costeira e na região continental da Croácia o aumento será de aproximadamente 5%.

Com relação ao potencial fotovoltaico, Pašičko, Brankovi e Šimić (2012) relataram que o efeito das mudanças climáticas não causará mudanças na produção fotovoltaica. Segundo os autores, a produção de energia fotovoltaica não terá mudanças significativas, pois será equilibrada por vários fatores, como aumento da temperatura média do ar e diminuição da cobertura das nuvens.

2.3.2.2. Resultados para o continente americano

A Tabela 2.2 apresenta os modelos climáticos utilizados nas projeções para o potencial solar e eólico em algumas regiões no continente americano.

Tabela 2.2: Modelos climáticos utilizados para estudar o comportamento do potencial solar e eólico diante das mudanças climáticas em algumas áreas no continente americano.

Autor(es)	Modelo	Local
Wang <i>et al.</i> (2020)	PRECIS	Ontário, Canadá
Viviescas <i>et al.</i> (2019)	MIROC-ESM-CHEM e HadGEM2-ES	América Latina
De Jong <i>et al.</i> (2019)	HADGEM2-ES, MIROC5, CANESM2. RCM: Eta	Brasil
Angeles <i>et al.</i> (2010)	Modelo climático paralelo (PCM) e o modelo numérico do sistema de modelagem atmosférica regional (RAMS)	Região do Caribe

Em seu trabalho Wang *et al.* (2020), a partir do PRECIS, evidenciaram que a geração solar poderá aumentar sob o cenário RCP4.5 e principalmente no RCP8.5 no período de 2080, com 70% de aumento em Ontário. Com relação a energia eólica, é prevista a redução da densidade eólica para ambos os cenários RCP na costa dos Grandes Lagos. Por sua vez, na Baía de Hudson espera-se um aumento futuro na densidade de energia eólica *onshore* e *offshore*.

Para a América Latina, Viviescas *et al.* (2019) projetaram que as regiões próximas ao Caribe, Venezuela, Suriname, Colômbia e Brasil apresentaram as maiores tendências para velocidade dos ventos a partir de 2040 sendo mais elevados sob o RCP8.5. No caso do recurso solar, os resultados evidenciaram que provavelmente não haverá variabilidade sob os cenários RCP4.5 e RCP8.5 em parte da área estudada. No Equador, sob o RCP4.5 e RCP8.5, e na Venezuela, sob o RCP4.5 as projeções mostraram uma tendência positiva para o recurso solar.

O potencial eólico e solar foram analisados por De Jong *et al.* (2019) no Brasil e por Angeles *et al.* (2010) na região do Caribe. Os estudos de De Jong *et al.* (2019) concentraram-se no período de 2070-2099. Para a década de 2080 os autores observaram o aumento da radiação solar na maior parte do Brasil podendo chegar a uma média de 3,6% na região Nordeste ao se comparar com a década de 2070. Utilizando o modelo

CANESM2/Eta projetou-se um aumento de 11,6% da radiação solar nas instalações solares fotovoltaicas em Pirapora, em Minas Gerais, no entanto, o modelo MIROC5/Eta registrou redução de 3,8% nas instalações de Guaimbé, São Paulo. No que concerne a energia eólica, os estados da Bahia e Maranhão, localizados no Nordeste do país, poderão apresentar aumento de respectivamente 19% a 33% na velocidade do vento para o modelo CANESM2/Eta. Segundo o HADGEM2/Eta, na década de 2080 a velocidade do vento terá aumento de em média 9,4% na maior parte da região Nordeste ao se comparar com a década de 2070.

Angeles *et al.* (2010) empregaram o modelo PCM acoplado ao modelo número RAMS e a partir das projeções realizadas os autores sugeriram que poderá haver uma leve redução da radiação solar para o período de 2041-2055 para a bacia do Caribe, sendo mais significativa no mar do oeste do Caribe. Além disso, para o período de 2070-2098 também poderá ocorrer uma diminuição da radiação solar. O lado leste de Porto Rico é uma área importante para a coleta de energia solar futura.

Para a velocidade do vento haverá um aumento sobre a região do Caribe, sendo de $4,84 \text{ ms}^{-1}$ para a velocidade mínima. O período de 2070-2098 demonstrou uma elevação para os ventos do leste ao redor da costa tendo uma intensidade eólica maior.

2.3.2.3. Resultados para o continente africano

Na Tabela 2.3 podem ser observados os artigos que projetaram dados climáticos para o potencial solar e eólico em regiões localizadas no continente africano e na África do Sul.

Tabela 2.3: Modelos climáticos utilizados para estudar o comportamento do potencial solar e eólico diante das mudanças climáticas em algumas áreas no continente africano.

Autor(es)	Modelo	Local
Sawadogo <i>et al.</i> (2020a)	RegCM4	África
Fant, Schlosser e Strzepek (2016)	Modelo Global Integrado de Sistemas (IGSM) e 8 GCMs disponíveis da fase 3 do Projeto de Inter comparação Modelo Acoplado (CMIP)	África do Sul

Para o período de 2020-2040 e 2041-2060, Sawadogo *et al.* (2020a) projetaram o aumento do potencial de energia fotovoltaica na África Ocidental, Central e na parte

oriental da África Austral. No cenário RCP8.5 percebe-se uma redução geral no potencial de energia fotovoltaica sobre o continente africano, com exceção de algumas regiões, como por exemplo, a África Central. As maiores reduções foram observadas no Chifre da África, África Austral Ocidental, Madagascar Ocidental, África do Norte e algumas partes do África Ocidental. Os resultados para o potencial eólico mostraram que nas regiões onde a intensidade do vento já é forte terão seu potencial melhorado, como por exemplo o noroeste da África e o Chifre da África. O potencial positivo dos ventos também foram projetados para a África Austral onde observou-se o aumento na densidade de energia eólica.

Fant, Schlosser e Strzepek (2016) concentraram-se em projetar dados para a energia eólica e solar para a África do Sul. Os dados sugeriram que o potencial eólico e solar apresentarão mudanças sucintas futuras até 2050. Na maior parte, as mudanças para velocidade do vento são baixas na África Austral, redução nas regiões costeiras da África do Sul, no período de junho a agosto e aumentos pequenos para Botsuana. Para irradiância horizontal global (GHI) haverá um aumento para as regiões do interior no período de dezembro a fevereiro. Por sua vez, na temporada que vai de junho a agosto foram projetadas reduções na maior parte da região, com exceção da região ao redor do Malawi, a oeste ao longo do equador, e a extremidade sudoeste da África do Sul.

Por fim, o artigo de Zhang *et al.* (2018) investigou os recursos eólicos e solares no mundo em 2016-2045, 2046-2065 e 2066-2099 comparados ao período de 1985-2005. As projeções para o período de 2016-2045 sob o RCP2.6 indicaram que o recurso eólico aumentará na América do Sul e África Central, todavia, os autores projetaram uma redução na América do Norte, Austrália e Norte da Ásia. Sob o RCP8.5, os resultados sugeriram o aumento na América do Sul, América do Norte Central e África Central, por sua vez, o recurso eólico poderá sofrer uma diminuição no Norte da Ásia e no Nordeste da Austrália.

As projeções de Zhang *et al.* (2018) para o período de 2046-2065 sob o RCP2.6 mostraram um provável aumento do potencial na maior parte do mundo, com exceção do Norte da Ásia. Nessa mesma região uma redução também foi observada sob o RCP8.5. Os autores projetaram que sob o RCP2.6 o recurso eólico diminuirá na maior parte do globo, com exceção da América do Sul, África Central e Meridional e Sudeste Asiático. Por sua vez, sob o RCP8.5, os recursos eólicos poderão aumentar na América do Sul, na maior parte da África e no sul da América do Norte, mas diminuiram no centro e norte da Ásia e na América do Norte Central.

No caso do recurso solar, as projeções evidenciaram o aumento durante todo século XXI sob os cenários RCP2.6 e RCP8.5, principalmente na Europa, leste da Ásia e leste da América do Norte, sendo mais significativo no RCP8.5. Para o leste da Ásia Zou *et al.* (2019) evidenciaram o aumento do potencial eólico (ZHANG *et al.*, 2019).

2.3.3. Resultados que discutiram o potencial solar fotovoltaico

2.3.3.1. Resultados para o continente europeu

Na Tabela 2.4 podem ser observados os artigos que projetaram dados climáticos para o potencial solar em regiões localizadas no continente europeu.

Tabela 2.4: Modelos climáticos utilizados para estudar o potencial solar fdiante das mudanças climáticas em algumas regiões no continente europeu.

Autor(es)	Modelo	Local
Katopodis <i>et al.</i> (2020)	Modelo de pesquisa e previsão do tempo (WRF)	Grécia
Müller <i>et al.</i> (2019)	23 modelos do CMIP5	Europa
Pérez <i>et al.</i> (2019)	CMIP5	Ilhas Canárias
Gunderson <i>et al.</i> (2015)	GCM: HadAM3H. RCM: HIRHAM	Países da região do Mar Negro

O estudo de Katopodis *et al.* (2020) foi realizado na Grécia e discutiu o potencial solar a partir do modelo regional WRF comparando o período histórico (1980-2004) com o futuro (2020-2040). As mudanças projetadas sugeriram o aumento da Irradiância Horizontal Global na primavera na maior parte do domínio grego nos cenários RCP4.5 e RCP8.5, com exceção, das áreas marinhas no mar Egeu e no mar Jônico. No verão, o aumento foi projetado nas regiões localizadas em áreas de maior altitude (como a Cordilheira Pindus e o Monte Olimpo) e no Nordeste da Grécia sendo maiores sob o RCP4.5. Por sua vez, no outono observou-se ligeiras reduções. Segundo Katopodis *et al.* (2020), a Grécia continuará tendo um potencial favorável para a energia solar.

Müller *et al.* (2019) analisaram o potencial fotovoltaico na Europa e Gunderson *et al.* (2015) investigaram o potencial da energia solar para os países da região do Mar Negro diante alterações climáticas futuras.

Os resultados de Müller *et al.* (2019) para o potencial fotovoltaico para o período de 2060-2080 comparado com o período de 2007-2027 demonstraram que a Europa Central e os países do Nordeste da Europa (Rússia, Escandinávia, Estados Bálticos e Finlândia) sofrerão uma redução do potencial fotovoltaico nos meses de inverno. Assim como o Sudeste do Mediterrâneo, regiões do norte e leste da bacia do Mediterrâneo. No verão e outono a diminuição ocorrerá na Europa Central e no Sudeste. Por sua vez, o norte da Espanha, a França e a Europa Central, no verão apresentarão uma mudança positiva. Segundo os autores, na parte central de toda Europa Meridional haverá aumento nos rendimentos de eletricidade, principalmente pelo fato de países como a Espanha, França, Itália e Alemanha terem uma grande capacidade futura fotovoltaica. Todavia, as regiões da Europa Setentrional apresentarão uma redução no potencial de produção de energia fotovoltaica.

Os resultados de Gunderson *et al.* (2015) indicaram que as alterações climáticas não causarão mudanças significativas no potencial solar fotovoltaico no próximo século nos países localizados na região do Mar Negro, ainda assim, o recurso solar disponível é suficiente para a geração de energia solar fotovoltaica nessa região.

Pérez *et al.* (2019) avaliaram o potencial fotovoltaico para as Ilhas Canárias para os períodos futuros de 2045-2054 e 2090-2099. As projeções indicaram aumento da radiação solar em consequência da diminuição da cobertura das nuvens. Por outro lado, no verão, a redução do potencial fotovoltaico ocorrerá em decorrência do aumento da temperatura que afeta a eficiência dos painéis fotovoltaicos. Segundo os autores, os resultados foram mais expressivos sob o RCP8.5 para o final do século XXI.

2.3.3.2. Resultados para os continentes africano e asiático.

A Tabela 2.5 apresenta os modelos climáticos empregados nas projeções para o potencial solar em estudos realizados nos continentes africano e asiático.

Tabela 2.5: Modelos climáticos utilizados para estudar o potencial solar diante das mudanças climáticas em algumas regiões nos continentes africano e asiático.

Autor(es)	Modelo	Local
Oka, Mizutani e Ashina (2020)	GFDL-CM3, GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, MIROC5h, MIROC-ESM-CHEM, MRI-CGCM3.0	Fukushima, Japão
Sawadogo, Abiodun e Okogbue (2020b)	14 modelos climáticos do CORDEX	África Ocidental
Ohunakin <i>et al.</i> (2015)	Modelo Regional de Clima do Centro de Física Teórica (ICTP) versão 3 (RegCM3) com ECHAM5	Nigéria

Oka, Mizutani e Ashina (2020) utilizaram um conjunto com sete modelos climáticos para o período de 2021-2040, 2041-2060 e 2061-2080 para os cenários RCP2.6, RCP4.5 e RCP8.5. Segundo os autores em Fukushima, no Japão, haverá o possível aumento do potencial para energia fotovoltaica em todos os períodos analisados. De acordo com os autores, esse aumento ocorrerá de forma gradativa.

Por sua vez, Ohunakin *et al.* (2015) projetaram redução da radiação solar nos três períodos futuros estudados (2011–2040, 2041-2070 e 2071-2100). Os autores observaram uma redução da radiação solar nos períodos futuros ao se comparar com o período de referência 1981-2010. Para o período de 2011-2040 os autores indicaram um menor potencial de radiação para a zona sul, todavia, um aumento progressivo para a zona norte. Na região sul da Nigéria os autores observaram a maior redução da radiação para os três períodos futuros estudados.

Sawadogo, Abiodun e Okogbue (2020b) indicaram redução do potencial de geração de energia fotovoltaica para toda a África Ocidental, com exceção das áreas costeiras e montanhosas, onde projetou-se um aumento. Resultados diferentes foram observados por Sawadogo *et al.* (2020a) e Sawadogo, Abiodun e Okogbue (2020b) onde aqueles projetaram o aumento do potencial de energia fotovoltaica para África Ocidental, e estes verificaram uma redução, com exceção, para algumas áreas. Por sua vez, Sawadogo *et al.*

(2020a) evidenciaram o aumento na densidade eólica para África Austral, enquanto Fant, Schlosser e Strzepek (2016) indicaram que são baixas as mudanças para a velocidade dos ventos na mesma região.

2.3.4. Resultados que discutiram o potencial eólico

2.3.4.1. Resultados para o continente europeu

Na Tabela 2.6 podem ser observados os artigos que projetaram dados climáticos para o potencial eólico em regiões localizadas no continente europeu.

Tabela 2.6: Modelos climáticos utilizados para estudar o potencial eólico em algumas regiões no continente europeu.

Autor(es)	Modelo	Local
Rusu (2020)	RCA4	Costa do Mar Báltico
Solaun e Cerdá (2020)	3 modelos climáticos do EURO-CORDEX	Quatro parques eólicos na Espanha
Rusu (2019)	RCA4	Costa do Mar Negro
Davy <i>et al.</i> (2018)	RCA4	Europa com foco no Mar Negro
Moemken <i>et al.</i> (2018)	GCMs: CNRM-CM5, EC-EARTH, HadGEM2-ES, MPI-ESM-LR e IPSL-CM5A-MR. RCM: COSMO-CLM e RCA4	Europa
Santos <i>et al.</i> (2018)	Modelos regionais CORDEX	Península Ibérica (Espanha e Portugal)
Weber, Gotzens e Witthaut (2018)	CNRM_CM5 EC_EARTH IPSL_CM5A_MR MPI_ESM_LR HadGEM2_ES do EURO-CORDEX e o RCM RCA4	Europa
Hdidouan e Staffell (2017)	ESM2G	Reino Unido
Soares <i>et al.</i> (2017)	Conjunto de modelos do experimento CORDEX e o WRF	Península Ibérica
González <i>et al.</i> , (2017)	14 GCM'S incluídos na fase 5 do projeto de Inter comparação de modelo acoplado (CMIP5)	Arquipélago montanhoso, Ilhas Canárias

Continuação da tabela 2.6

Koletsis <i>et al.</i> (2016)	GCMs: Bergen Climate Model (BCM), (ECHAM5 / MPI e o (HadCM3Q16) RCM's: KNMI-RACMO2 e o HIRHAM5	Áreas marítimas do Mar Mediterrâneo e uma grande parte do Mar Negro
Monforti, Gaetani e Vignati (2016)	12 modelos climáticos regionais do ENSEMBLES	Europa
Gonçalves-Ageitos <i>et al.</i> (2015)	Modelo Regional de Clima (WRF)	Algumas regiões na Europa
Santos <i>et al.</i> (2015)	COSMO-CCLM acionado pelo ERA-40. COSMO-CCLM conduzido com ECHAM5	Península Ibérica
Lizuma <i>et al.</i> (2013)	RCM: CLM Modelo de Área Limitada de Alta Resolução (Hirlam)	Mar Báltico próximo a Costa Letã
Barstad, Soterberga e Mesquita (2012)	Modelo Arpege	Norte da Europa
Pryor, Barthelmie e Schoof (2006)	HadCM3	Europa
Pryor, Barthelmie e Kjellström (2005)	ECHAM4/OPYC3 HadAM3H	Norte da Europa

O comportamento eólico diante das mudanças climáticas foi avaliado por Moemken *et al.* (2018), Weber, Gotzens e Witthaut (2018), Monforti, Gaetani e Vignati (2016), Gonçalves-Ageitos *et al.* (2015) e Pryor, Barthelmie e Schoof (2006) para toda a Europa e por Barstad, Sorteberg e Mesquita (2012) e Pryor, Barthelmie e Kjellström (2005) para o norte europeu.

Os resultados apresentados por Moemken *et al.* (2018) para o conjunto RCA4 indicaram que haverá um decréscimo para a saída de energia eólica no cenário RCP4.5 durante o período de 2021-2050 para a Escandinávia e Península Ibérica e um aumento da energia eólica para o Mar Báltico e parte do Mar Egeu. Destaca-se situação positiva para o Mar Báltico e Egeu em todos os CGM's. O conjunto RCA4 ainda apontou um aumento do potencial eólico para o Atlântico Norte, Europa Central (incluindo França, partes da Alemanha e Polônia) e partes da Escandinávia e região Báltica durante o inverno 2071-

2100. Por outro lado, os resultados para Ilhas Britânicas, Sul da Europa e parte da Escandinava apontam uma diminuição de 66% do potencial eólico para o RCP4.5 e de 75% para o RCP8.5. A utilização de diferentes modelos climáticos por Moemken *et al.* (2018) apontaram resultados distintos em algumas situações, o MPI-ESM-LR apresentou um aumento significativo para a energia eólica (até 10%) para a Europa central e oriental, enquanto EC-EARTH e HadGEM2-ES mostram um decréscimo para as mesmas regiões. Já as simulações geradas pelos modelos CNRM-CM5, MPIESM-LR e IPSL-CM5A-MR descrevem o aumento do potencial eólico para a Europa central e ocidental, por sua vez, a projeção realizada com HadGEM2-ES apontam diminuição de 20% para todo o continente.

Weber, Gotzens e Witthaut (2018) utilizaram um conjunto com cinco modelos climáticos globais do EURO-CORDEX e o modelo climático regional RCA4 para projetar as condições de geração de energia eólica para o período de 2070-2100 na Europa. Os autores observaram que poderá haver uma redução da velocidade dos ventos que estavam entre 3 m/s e 12 m/s para abaixo de 3 m/s na Europa Continental e, portanto, a possibilidade de turbinas eólicas ficarem ociosas. Reduções também poderão ocorrer no Oceano Atlântico e Mar Mediterrâneo o que pode gerar impactos futuros em parques eólicos *offshore*. Na Suécia, Finlândia e Estônia, os autores sugeriram que há a probabilidade de a geração de energia eólica ser baixa. Resultados complementares foram encontrados para o Mar Báltico, Mar Egeu e o Estreito de Gibraltar os quais poderão ser locais favoráveis para a instalação de parques eólicos *offshore*.

Os estudos de Monforti, Gaetani e Vignati (2016) indicaram que a densidade eólica se mantém estável na Europa continental no período de 1961-2050, tendência contrária ao que ocorre no Mar Mediterrâneo e no Mar do Norte, os quais demonstraram uma diminuição. Além disso, projetou-se um aumento para o Mar Báltico e Ilhas Britânicas. No geral, os autores sugeriram que o impacto que as mudanças climáticas na energia eólica não são significativas.

Lizuma *et al.* (2013) demonstraram resultados para o potencial eólico para o Mar Báltico próximo a Costa Letã. Os autores perceberam que os resultados para velocidade do vento são mais baixos para 2071-2100 do que para o período de 2021-2050 e uma leve diferença quando comparadas ao período histórico de 1981-2010. A resposta para o final do século XXI apontaram pequenas mudanças no potencial energético dos ventos, entre 2% e 4%, o aumento se dará nos territórios *offshore*, entre 1% e 2%, e redução de menos de 1% para as áreas costeiras.

Em seu estudo Rusu (2020), a partir do modelo RCA4, projetou que para 2021-2050 haverá um pequeno aumento da energia eólica nos pontos estudados no Mar Báltico, sendo mais favorável no inverno, enquanto uma redução foi notada no verão. De acordo com os autores, os parques eólicos alemão *EnBW Baltic 1* e *EnBW Baltic 2* e o dinamarquês *Anholt* apresentaram a potência eólica média mais elevadas.

Lizuma *et al.* (2013), Monforti, Gaetani e Vignati (2016), Moemken *et al.* (2018), Weber, Gotzens e Witthaut (2018) e Rusu (2020) projetaram um cenário eólico futuro positivo para o Mar Báltico, destaca-se que Moemken *et al.* (2018) e Weber, Gotzens e Witthaut (2018) utilizaram alguns modelos climáticos comuns.

Em seu estudo Gonçalves-Ageitos *et al.* (2015) observaram uma diminuição na velocidade média dos ventos na costa da Cordilheira do Sul do Mediterrâneo (os Pireneus e o Sistema Ibérico) para o cenário A2 (cenário de altas emissões) durante o período de 2031-2050. Notaram que essa diminuição da velocidade média dos ventos poderá afetar as áreas onde estão localizados os parques eólicos. As simulações geradas pelo WRF-EH1 A2 e WRF-EH3 A2 indicaram redução na densidade da energia eólica e essas mudanças podem causar variações nas regiões potenciais para a construção de moinhos eólicos.

Em seu estudo Pryor, Barthelmie e Schoof (2006) projetaram o aumento do potencial eólico para os países europeus com o modelo HadCM3 e identificaram que os dados do ECMWF indicaram que a Dinamarca terá um potencial eólico coeso para a produção de energia eólica futura. Por sua vez, os dados do NCEP/NCAR apontaram uma menor variabilidade interanual para a Islândia.

As simulações realizadas por Barstad, Soterberg e Mesquita (2012) para o período de 2020-2049 demonstraram que o potencial eólico sofrerá uma redução na maior parte do norte da Europa, incluindo o Mediterrâneo. Por sua vez, no oceano Atlântico Norte, uma pequena região na costa oeste da Noruega e no sudeste da Península Ibérica haverá um aumento no potencial eólico.

Pryor, Barthelmie e Kjellström (2005) identificaram que para o ECHAM4/OPYC3 haverá um pequeno aumento no potencial eólico para o período de 2071-2100. Todavia, para o modelo HadAM3H os resultados apontaram diminuição ou nenhuma variação durante o mesmo período. Os autores sugeriram que há incertezas sobre a densidade energética e a velocidade do vento para o Norte Europeu.

Nos resultados para as Ilhas Britânicas há uma discordância entre Monforti, Gaetani e Vignati (2016) e Moemken *et al.* (2018). Enquanto os primeiros encontraram um

aumento do potencial eólico para as Ilhas Britânicas para o período de 1961-2050, os segundos identificaram uma diminuição do potencial eólico para Ilhas Britânicas, nesse caso, para o conjunto de modelos do RCA4 no período de 2071-2100.

Para o Norte Europeu, Pryor, Barthelmie e Schoof (2006) e Pryor, Barthelmie e Kjellström (2005) ao utilizar o modelo ECHAM4/OPYC3 concordam quanto ao aumento da capacidade eólica, no entanto, ao utilizar o modelo HadAM3 Pryor, Barthelmie e Kjellström (2005) encontraram um decréscimo para o potencial eólico, resultado também observado por Barstad, Soterberga e Mesquita (2012) e por Moemken *et al.* (2018). No caso de Moemken *et al.* (2018) a redução observada é de até 1,2 m/s para o período de 2006-2100.

Santos *et al.* (2015), Soares *et al.* (2017) e Santos *et al.* (2018) analisaram o potencial eólico diante das mudanças climáticas para a Península Ibérica. O comportamento eólico para os períodos de 2019– 2045, 2046–2072 e 2073–2099 foram avaliados por Santos *et al.* (2018) que identificaram uma diminuição na velocidade e na potência dos ventos para a Península Ibérica, Baleares e Costa, tanto para o Ocidente quanto para o Oceano Atlântico. No entanto, algumas regiões, como: Galiza, a costa atlântica da Galiza e Norte de Portugal, o vale do Ebro, o vale do Douro superior, o vale do *Guadalquivir*, o Estreito de Gibraltar e o Cabo Gata terão um aumento no potencial e na velocidade dos ventos. Esse cenário positivo será maior no verão, com exceção do Estreito de Gibraltar que apresentará esse cenário durante todo ano. Destaca-se que esse comportamento eólico é maior a cada período. A partir dos resultados analisados, Santos *et al.* (2018) evidenciaram que poderá ocorrer o aumento do potencial eólico em 2019-2045 no Vale do Ebro e no Estreito de Gibraltar. Os autores indicaram que para o período de 2073-2099 a região da Galiza e sua costa atlântica, o vale do *Guadalquivir* e o Cabo Gata demonstraram pontos crescentes para o potencial eólico, sendo que o estreito de Gibraltar terá um aumento maior do que 25%, todavia algumas áreas apresentarão redução de mais de 20%.

As análises para o período de 2071-2100 realizadas por Soares *et al.* (2017) indicaram que no cenário RCP4.5 as velocidades anuais do vento se manterão quase inalteradas, todavia apresentará uma leve redução entre 2,5 e 5% na parte ocidental do domínio e em áreas localizadas ao longo da costa sul de Portugal. Além disso, a velocidade dos ventos marítimos se manterá igual no inverno e na primavera, sofrerá uma queda no outono, mas apresentará um aumento superior a 5% na costa noroeste para o verão. Para o

cenário RCP8.5 a velocidade média do vento diminuirá entre 2,5 e 5% principalmente no sudoeste da Península Ibérica, segundo o WRF9 km. Ao empregar os modelos WRF9 km, o ENS_F e o ENS_S, os autores projetaram uma redução na densidade eólica na costa, podendo chegar a 10% e acima de 5% nas áreas marítimas. Os três modelos empregados também indicaram velocidades inalteradas para o noroeste da Península.

Os resultados encontrados por Santos *et al.* (2015) para o período de 2071-2100 mostraram uma diminuição do potencial eólico na maior parte da Península Ibérica, sendo as reduções mais significativas encontradas no inverno e na primavera. Foi observada diminuição no norte da Galiza, na faixa norte da Península Ibérica e no Vale do Ebro durante o inverno. O norte da Galiza também apresentou diminuição do potencial eólico no outono, e decréscimo mais acentuado no noroeste da Península, no norte da Galiza, em Burgos e no Oeste na primavera. Por outro lado, a região sul da Andaluzia, Estreito de Gibraltar apresentaram um significativo aumento da capacidade eólica no futuro. No verão, os resultados são positivos para *Bochorno* e *Cierzo* (vale do Ebro), Galelo (Vale do Douro) e Solano (Albacete), sendo que o Vale do Ebro também apresentou tendências positivas para a primavera. Por fim, os resultados para o sul da Andaluzia são otimistas para o inverno, verão e outono.

Resultados negativos para o potencial eólico na Península Ibérica foram encontrados por Moemken *et al.* (2018) e Santos *et al.* (2018) para todos os períodos; Soares *et al.* (2017) para a parte ocidental e sudoeste da Península e Santos *et al.* (2015) para o noroeste da Península. Esses resultados são distintos dos indicados por Soares *et al.* (2017) os quais identificaram um cenário inalterado para o noroeste da Península nos três modelos climáticos utilizados e um aumento para a costa. Destaca-se que os autores citados utilizaram modelos climáticos diferentes. Por fim, Barstad, Soterberga e Mesquita (2012), diferente dos outros autores, encontraram um potencial positivo para Península Ibérica.

Projeções realizadas por Solaun e Cerdá (2020), em quatro parques eólicos, na Espanha para o período de 2018-2041 e 2042-2065 indicaram declínio do potencial eólico para os parques eólicos de *Cuadramón* (localizado na Galícia) e *Rubió* (localizado na Catalunha) em todos os cenários e períodos temporais se intensificando no futuro mais distante. No caso do parque eólico de *Río Almodóvar* (localizado em Andaluzia), os autores evidenciaram um possível aumento futuro para a velocidade dos ventos. Por fim, os Solaun e Cerdá (2020) mostraram que para o parque eólico de *El Pérdon* (localizado em

Navarre) os resultados apresentaram uma variabilidade a depender do período e cenário considerado.

Rusu (2019) analisou a Costa do Mar Negro, Davy *et al.* (2018) avaliaram a Europa com foco no Mar Negro e Koletsis *et al.* (2016) estudaram as áreas marítimas do Mar Mediterrâneo e uma grande parte do Mar Negro para a energia eólica. Rusu (2019) identificou que para o período de 2021-2050, tanto para o cenário RCP4.5 quanto para o cenário RCP8.5 o noroeste do Mar Negro apresenta um melhor potencial futuro e o lado ocidental da costa do Mar Negro terá a máxima energia eólica. Ambos os cenários apontaram que a localização costeira com a máxima energia eólica será movida para o lado ocidental do Mar Negro.

Os resultados de Davy *et al.* (2018) para o período de 2021-2050 e 2061-2090 indicaram que haverá uma redução na densidade de energia eólica no Mar de Azov para ambos os períodos no cenário RCP8.5. No cenário RCP4.5 não haverá mudanças significativas para os mesmos períodos temporais. Para o noroeste do Mar Negro não foram encontradas mudanças significativas para a densidade eólica nem para a energia eólica extraível (EWP) em nenhum dos cenários, por outro lado, no sudeste do Mar Negro encontraram uma redução no EWP no período de 2061-2090 para o RCP8.5. Segundo Davy *et al.* (2018) a energia eólica pode ser um recurso viável para os países do norte e oeste do Mar Negro, como a Ucrânia e a Rússia.

As simulações realizadas por Koletsis *et al.* (2016) para o período de 2021-2050 indicaram um aumento da velocidade do vento no Mar Egeu e no sudeste do Mar Negro e o oeste da beira-mar do Estreito de Gibraltar. O modelo HadCM3Q16/RCA3 para o período de 2061-2090 projetou elevação na velocidade do vento para o leste do Mediterrâneo, o Mar de Alborão, parte leste do Mar Negro e principalmente sobre o Norte do Mar Egeu. Sobre o Mar Egeu, todos os modelos, com exceção do ECHAM5-r3/HIRHAM5, apresentaram tendência positiva para o potencial eólico. O estreito de Gibraltar também demonstrou cenário positivo no período de 2061-2090. Por sua vez, no período de 2061-2090 foi observado uma diminuição em grande parte do Mar Mediterrâneo chegando a ser de 200 Wm^{-2} nas projeções do HIRHAM5 para o período de 2021-2050. Observa-se que a utilização de distintos modelos resultou em respostas distintas. Sobre o Mar Egeu, em julho, o modelo ECHAM5-r3/HIR-HAM5 apresentou redução da energia eólica de 100 a 200 Wm^{-2} para ambos os períodos futuros, por outro lado, o modelo BCM/HIR-HAM5 indicou um aumento de 300 Wm^{-2} . Durante o período de

2061-2090 também aconteceram distinções, o modelo ECHAM5-r3/HIRHAM5 indicou uma diminuição de aproximadamente 200 Wm^{-2} , enquanto ECHAM5-r3/RACMO2 e ECHAM5 identificaram elevação de 100 a 200 Wm^{-2} .

Os autores Pryor, Barthelmie e Schoof (2006), Monforti, Gaetani e Vignati (2016) e Koletsis *et al.* (2016) concordam sobre a redução do potencial eólico para o Mar Mediterrâneo. No caso de Koletsis *et al.* (2016) a redução se deu apenas em parte do Mar Mediterrâneo. Por sua vez, Gonçalves-Ageitos *et al.* (2015) apontaram um aumento para a capacidade eólica no sul do Mediterrâneo para o período entre 2031-2050 e Koletsis *et al.* (2016) para o leste do Mar Mediterrâneo para o modelo HadCM3Q16/RCA3.

Santos *et al.* (2015) e Santos *et al.* (2018) concordam quanto ao aumento do potencial eólico para o Estreito de Gibraltar, o Vale do Ebro e o Vale do Douro, todavia, para nas projeções realizadas na Galiza Santos *et al.* (2018) encontraram aumento no potencial eólico para costa atlântica da Galiza e Santos *et al.* (2015) verificaram uma redução da capacidade eólica para o norte da Galiza no inverno, outono e primavera. Ressalta-se que os autores utilizaram modelos climáticos distintos.

Assim como Santos *et al.* (2015), Koletsis *et al.* (2016) Santos *et al.* (2018) e Weber, Gotzens e Witthaut (2018) também apontaram uma tendência positiva para o Estreito de Gibraltar, sendo que Koletsis *et al.* (2016) referem-se à beira-mar do estreito de Gibraltar.

Koletsis *et al.* (2016), Moemken *et al.* (2018) e Weber, Gotzens e Witthaut (2018) identificaram o aumento do potencial eólico futuro para o Mar Egeu, todavia, ao utilizar o modelo ECHAM5-r3/HIRHAM5 projetaram uma redução.

Koletsis *et al.* (2016), Davy *et al.* (2018) e Rusu (2019) indicaram potencial eólico positivo para o Mar Negro. Sendo que Koletsis *et al.* (2016) e Davy *et al.* (2018) apontaram uma capacidade eólica otimista para o sudeste do Mar Negro, todavia, Koletsis *et al.* (2016) também destacaram o leste do Mar Negro. Por sua vez, Rusu (2019) identificou um potencial eólico para o noroeste do Mar Negro, durante o período de 2021-2050, resultado distinto do apresentado por Davy *et al.* (2018) que não encontraram uma mudança significativa para a mesma região no período de 2061-2090.

Hdidouan e Staffell (2017) estudaram uma série de impactos que a mudança climática poderá causar na energia eólica, nos custos, na distribuição horária da velocidade dos ventos, entre outros, no Reino Unido no período de 2006-2100. O aumento da velocidade média anual dos ventos será mais intenso para o RCP8.5 e mais fraco para o

RCP2.6, sendo o recurso eólico maior no Atlântico Norte e no Norte da Escócia. Redução na velocidade do vento foi identificada no Canal Inglês e no Sul da Inglaterra, para esse caso a diminuição é mais acentuada sob o cenário RCP6.0.

Barstad, Soterberga e Mesquita (2012), Hdidouan e Staffell (2017) e Moemken *et al.* (2018) concordam com o aumento do potencial eólico para o Atlântico Norte. No caso de Moemken *et al.* (2018) apenas para o conjunto RCA4, RCP4.5 no período de 2071-2100.

Os resultados de González *et al.* (2017) para o período temporal de 2045-2054 e 2090-2099 indicaram um aumento significativo, cerca de 15%, da energia eólica extraível na costa leste de *La Palma*, *Tenerife*, *Gran Canaria* e *Fuerteventura*, nesta última o aumento também ocorrerá na região sul. Por sua vez, em *La Palma*, *El Hierro*, *La Gomera* e *Tenerife* foi projetada uma redução. Ocorre que a velocidade do vento terá um cenário favorável para toda região de *Fuerteventura*, enquanto os parques eólicos de *Lanzarote* não sofrerão mudanças significativas. Por fim, a parte norte e sul da ilha serão as mais afetadas. As mudanças mais significativas acontecerão no RCP8.5 para os dois períodos temporais futuros, espera-se que as reduções mais relevantes se darão na parte central de *La Palma*, costa norte de *La Gomera* e *El Hierro*, norte e sudeste, costa de *Tenerife*, costa norte e sul da *Gran Canaria* e costa noroeste de *Lanzarote* e *Fuerteventura*.

2.3.4.2. Resultados para o continente americano

Na Tabela 2.7 observa-se detalhadamente os modelos climáticos aplicados nas projeções para o potencial eólico em diferentes regiões no continente americano.

Tabela 2.7: Modelos climáticos utilizados para estudar o potencial eólico diante das mudanças climáticas em algumas regiões no continente americano.

Autor(es)	Modelo	Local
Costoya <i>et al.</i> (2020)	12 modelos do NACORDEX	Costas oeste e leste dos Estados Unidos
Chen (2020)	12 modelos do NACORDEX	América do Norte
Costoya <i>et al.</i> (2019)	RCM: RCA4 e sete GCMs	Caribe
Wang, Ullrich e Millstein (2018)	VR-CESM, MERRA-2, CFSR, NARR.	Califórnia
Ruffato-Ferreira <i>et al.</i> (2017)	Eta-HadGEM2-ES	Brasil
Johnson e Erhardt (2016)	NARCCAP: combinação de GCMs e RCM's. Neste caso: RCM3/GFDL, RCM3/CGCM3, WRFG/CCSM e WRFG/CGCM3.	Estados Unidos
Pereira <i>et al.</i> (2013)	Eta-HadCM3	Brasil
Lucena, Schaeffer e Szklo (2010)	HadCM3	Brasil
Sailor, Smith e Hart (2008)	ECHAM5/MPI-OM, GFDL-CM2.1, GIS- S-ER e MRI-CGCM2.3.2.	Idaho, Montana, Oregon, Washington e Wyoming – Noroeste dos Estados Unidos
Pan <i>et al.</i> (2004)	HadCM2 e RegCM2	Estados Unidos

Pan *et al.* (2004) e Johnson e Erhardt (2016) analisaram como a variação climática para os Estados Unidos afetará o potencial eólico para a produção de energia. Johnson e Erhardt (2016) utilizaram um conjunto de quatro GCM's/RCM's para realizar as projeções climáticas para os cenários de 2038-2070 para os modelos controlados pelo RCM3 e de 2038-2069 para os modelos controlados pelo WRFG. Os quatro conjuntos de modelos concordam que haverá uma mudança negativa para velocidade média dos ventos para o noroeste, nordeste e ao longo da costa leste dos Estados Unidos e aumento da densidade eólica no centro-oeste, com Wyoming com a maior densidade. O Kansas, Oklahoma e

Texas apresentarão aumento na velocidade do vento e na densidade eólica, neste caso, sendo os únicos estados onde a projeção de crescimento da energia eólica chega a mais de 2% para todos os cenários.

Os resultados apontados por Pan *et al.* (2004) indicaram que em meados do século XXI uma diminuição no potencial eólico será observada em boa parte do país, no centro-norte dos EUA, áreas costeiras da Califórnia e nas áreas montanhosas do Noroeste, por exemplo. Cenário distinto projetado para o centro-sul e o litoral noroeste dos EUA e na Virgínia. Por sua vez, no litoral dos Estados Unidos, na região montanhosa do oeste, os Grandes Lagos, na área da costa Noroeste e às áreas costeiras do leste dos Estados Unidos foi encontrado um alto potencial eólico no inverno. No geral, para o cenário climático de CO₂ melhorado o potencial eólico apresentará um declínio entre 0-30%, com exceção de algumas áreas pequenas no país que demonstraram um aumento também de 0-30%.

O potencial eólico foi analisado por Wang, Ullrich e Millstein (2018) nos parques eólicos da Califórnia-EUA, por Sailo, Smith e Hart (2008) no noroeste dos Estados Unidos e por Bogardi e Matyasovszky (1996) em Nebraska-EUA. Os resultados de Wang, Ullrich e Millstein (2018) para o período de 2030-2050 demonstraram que a velocidade dos ventos será maior no verão e se reduzirão no inverno, essas mudanças são significativas sob o RCP8.5. Para o sul da Califórnia foram projetados aumento dos ventos para os meses de junho, julho e agosto. Dos cinco parques eólicos levados em consideração, observou-se aumento do recurso eólico no verão e redução no outono e inverno gerando redução na produção em todos os parques estudados, exceto em *Altamont Pass*.

Os resultados gerados por Sailor, Smith e Hart (2008) para o noroeste dos Estados Unidos aplicando distintos modelos climáticos geraram resultados divergentes. Os dados obtidos para estação de *Yakima*, a partir dos modelos GISS e MPI, mostraram um aumento de 5-6% na velocidade dos ventos. Por outro lado, nos modelos GFDL e MRI as projeções indicaram uma redução, sendo de 1% no modelo GFDL e de 4% para o modelo MRI durante o mês de maio sob o cenário AIB. Os resultados para o inverno evidenciaram o provável aumento do potencial eólico superior a 80% de novembro a fevereiro, todavia, uma redução de mais de 30% no modelo MPI durante 3 dos 4 meses de inverno.

No geral, o potencial eólico futuro será reduzido em 40% nos meses de primavera e verão. Para o inverno os resultados são variáveis, ainda assim, parte dos modelos indicaram um maior potencial para energia eólica.

Johnson e Erhardt (2016) e Smith e Hart (2008) encontraram uma diminuição do potencial eólico para o noroeste dos Estados Unidos. Por sua vez, Pan *et al.* (2004) sugeriram que essa redução acontecerá em áreas montanhosas ao noroeste do país, todavia, no inverno a costa noroeste apresentará um aumento do potencial eólico em meados do século XXI.

Projeções para energia eólica *offshore* na costa leste e oeste dos Estados Unidos realizadas por Costoya *et al.* (2020) projetaram a redução do potencial eólico, sendo mais intenso ao longo da costa leste. Regiões localizadas na parte central de ambas as costas indicaram condições favoráveis para o recurso eólico. Por fim, segundo os autores as áreas costeiras na parte central da costa oeste não apresentarão mudanças.

Para a América do Norte Chen (2020) utilizou um conjunto de 12 modelos do NACORDEX para o período de 2031-2060 e 2071-2100. O autor projetou que sob o cenário RCP8.5 a energia eólica poderá sofrer uma redução em parte do oeste e da costa leste dos EUA. Todavia, aumentos foram projetados nas Grandes Planícies na primavera, no Texas, em Oklahoma no verão e nas Planícies do norte e centro-oeste no inverno e na primavera. A redução do potencial eólico também foi observada por Zhang *et al.* (2018) na região central da América do Norte.

O comportamento eólico foi estudado por Lucena, Schaeffer e Szklo (2010) e Pereira *et al.* (2013) para todo território brasileiro. Lucena, Schaeffer e Szklo (2010) utilizaram o modelo HadCM3 para três períodos futuros (2071-2080, 2081-2090 e 2091-2100) a partir dos cenários A2 (cenário de altas emissões) e B2 (cenário de baixas emissões) do IPCC. De acordo com os autores as projeções para o Brasil indicaram um potencial positivo para geração de energia eólica, além disso, Lucena, Schaeffer e Szklo (2010) destacaram o aumento dos ventos para as regiões Norte e Nordeste e nas áreas costeiras.

Por sua vez, Pereira *et al.* (2013) identificaram que para o período de 2071-2100 haverá uma tendência decrescente para a densidade eólica, principalmente ao longo do estado da Bahia, no entanto, esse cenário é distinto do que se encontrou para a área marítima do Norte e Nordeste do país. A região Nordeste terá a maior tendência crescente no outono, por sua vez, a região Sul terá um crescimento moderado em comparação com a região Nordeste.

De acordo com Costoya *et al.* (2019) em 2019-2099 no Mar do Caribe haverá um cenário favorável para a energia eólica. Na estação seca, foram projetados ventos acima de

10 ms⁻¹ para as bacias da Colômbia e da Venezuela, todavia, para essa mesma estação ventos moderados foram simulados para a bacia de *Yucatán* e uma pequena região da Venezuela. A diminuição dos ventos para a estação citada ocorreu na maior parte do Caribe. No período chuvoso, a única queda no potencial eólico foi observada para a bacia de *Yucatán*.

O aumento da velocidade do vento encontrado por Angeles *et al.* (2010) em 2070-2098 combina com o potencial favorável para energia eólica identificado por Costoya *et al.* (2019) no período de 2019-2099 para o Mar do Caribe.

Ruffato-Ferreira *et al.* (2017) analisaram o potencial eólico e hidroelétrico no Brasil para os períodos de 2010-2040, 2041-2070 e 2071-2100. Os resultados indicaram que haverá um aumento na velocidade do vento para as regiões Norte, Nordeste e Sul, o que as caracterizam como áreas potenciais para a produção de energia eólica, em todos os cenários avaliados. Sob o RCP4.5, no outono e no verão, e sob o RCP8.5, na primavera e no verão, terão os cenários mais significativos para o potencial eólico. Por sua vez, a região centro-oeste, no RCP4.5, e o Estado do Amazonas apontaram uma redução na velocidade do vento.

Para o Nordeste brasileiro os autores concordam em parte com o aumento do potencial eólico. Ruffato-Ferreira *et al.* (2017) encontraram um aumento no potencial eólico no Nordeste com cenário favorável para produção de energia eólica. De Jong *et al.* (2019) destacaram o aumento de 33% do potencial eólico para o Maranhão e de 19% para Bahia e Lucena, Schaeffer e Szklo (2010) sugeriram um possível aumento do potencial eólico para todo país. Todavia, Pereira *et al.* (2013) relataram uma redução da capacidade eólica para Bahia. Por fim, Ruffato-Ferreira *et al.* (2017) e Pereira *et al.* (2013) encontraram um aumento no potencial eólico para região Sul. Resultado que diverge do observado Pereira *et al.* (2013), os quais destacaram que a elevação na densidade eólica acontecerá de forma moderada comparada à região Nordeste.

2.3.4.3. Resultados para o continente africano e asiático

A Tabela 2.8 indica os modelos climáticos utilizados para projeção de dados para o potencial eólico em estudos realizados em localidades nos continentes africano e asiático.

Tabela 2.8: Modelos climáticos utilizados para estudar o potencial eólico diante das mudanças climáticas em algumas regiões nos continentes africano e asiático.

Autor(es)	Modelo	Local
Guo <i>et al.</i> (2019)	Precis	China
Gao, Ma e Wang (2019)	CORDEX-EA	China
Matthew e Ohunakin (2017)	ICTP-RegCM3	Nigéria
Chang <i>et al.</i> (2015)	ECHAM5, CM2.1 e CGCM2.3.2	Estreito de Taiwan
Ratjiranukool e Ratjiranukool (2015)	Modelo PRECIS conduzidos pelos modelos HadAM3P e ECHAM	Tailândia
Silang <i>et al.</i> (2014)	RegCM3	Pililla, Rizal, Filipinas

Os resultados para o Estreito de Taiwan, apresentados por Chang *et al.* (2015) para o período de 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2100, mostraram que em 2011-2100 poderá haver uma redução da velocidade do vento e da densidade da energia eólica, esse resultado foi observado em todos os modelos aplicados. Dos três modelos empregados, o CGCM2.3.2 apresentou a menor projeção para a velocidade dos ventos futuros. No geral, os resultados indicaram que o estreito de Taiwan sofrerá um impacto no recurso eólico devido às mudanças climáticas até o final do século XXI.

Ratjiranukool e Ratjiranukool (2015) simularam as condições dos ventos a partir do modelo PRECIS conduzidos pelos modelos HadAM3P e ECHAM para o período futuro de 2071-2100 utilizando os cenários de emissões A2 e B2. Os autores observaram mudanças positivas projetadas para a produção eólica na maior parte da Tailândia.

Guo *et al.* (2019) e Gao, Ma e Wang (2019) projetaram as condições para energia eólica na China. Guo *et al.* (2019) projetaram aumento do potencial eólico no sudeste da China até metade do século XXI. A velocidade média dos ventos aumentará também no

noroeste, nordeste e sul de *Guizhou*, além de um pequeno aumento no oeste da China no início do século XXI. No cenário RCP4.5 projeta-se aumento nas regiões centrais chinesa e sob o RCP8.5 a elevação da densidade eólica foi observada nas regiões sudeste, principalmente no leste de *Sichuan*. Os autores também projetaram a redução da velocidade dos ventos em boa parte da China, com destaque para as montanhas de *Tianshan* e no sudeste do platô do Tibete e na maior parte de *Yuann* para metade do final do século XXI no RCP4.5. Sob o RCP8.5 a redução foi projetada para o sudeste do Tibete e para o oeste, noroeste e centro da Mongólia no final do século XXI.

Por sua vez, Gao, Ma e Wang (2019) para o período de 2040-2049 projetaram uma diminuição do potencial de energia eólica para o Platô do Tibete, no Corredor *Hexi*, no interior da Mongólia e em parte de três províncias do nordeste chinês no RCP4.5 e RCP8.5. No RCP4.5 e no RCP8.5 percebeu-se pequenas reduções do recurso eólico para áreas na China, todavia, há exceções, no RCP8.5 no verão onde identificou-se aumento do fator de capacidade eólico para boa parte da China e no RCP4.5 um leve aumento para o sudeste (Bacia *Sichuan*).

Silang *et al.* (2014) utilizaram o RegCM3 e comparando os períodos de 2008-2012 com o de 2013-2037 para *Pililla, Rizal*, Filipinas. Os autores indicaram o aumento da densidade eólica e do fator de capacidade para o período 2013-2037.

Guo *et al.* (2019) e Gao, Ma e Wang (2019) encontraram resultados semelhantes para a bacia de *Sichuan*, Platô do Tibete e Mongólia. Guo *et al.* (2019) projetaram aumento do potencial eólico para leste de *Sichuan* e Gao, Ma e Wang (2019) para sudeste da mesma área. Com relação ao Platô do Tibete ambos os autores concordam com a redução do potencial eólico e para Mongólia Guo *et al.* (2019) observaram redução para o oeste, noroeste e centro e Gao, Ma e Wang (2019) para o interior.

Os resultados apresentados por Chang *et al.* (2015) para o período de 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2100 apontaram que a velocidade do vento apresentará um decréscimo nas áreas marítimas próximas à costa sudoeste de Taiwan e que a medida que a distância da costa diminui a velocidade do vento também reduz. Comparados com o período passado de 1981-2000 a velocidade média dos ventos sofrerá uma diminuição assim como a densidade eólica a qual sofrerá redução de 3%. A menor densidade eólica foi projetada pelo modelo CGCM2.3.2 para os três períodos climáticos futuros. No geral, os resultados indicaram que o estreito de Taiwan sofrerá um pequeno impacto no recurso eólico devido às mudanças climáticas até o final do século XXI.

Matthew e Ohunakin (2017) investigaram o potencial eólico na Nigéria. Os resultados de Matthew e Ohunakin (2017) para o período de 2031-2050 apontaram um aumento da velocidade do vento na estação chuvosa (maio a julho), todavia, a estação seca (outubro a janeiro) apresentou um declínio. Os resultados ainda indicaram que a região Sul, nos meses de fevereiro e março passarão por mudanças negativas para a energia eólica, ao contrário do que foi projetado para a região norte que apresentou cenário positivo.

Por fim, em seu artigo Zou *et al.* (2019) utilizaram 36 modelos de Inter comparação do Modelo Acoplado Fase 5 (CMIP5) e projetaram dados para China, Japão, África, Oriente, Índia, Ásia, Austrália, Europa, América do norte, América do Sul e América Central. Os autores avaliaram o potencial fotovoltaico para essas regiões para o período de 2006-2100 sob o RCP8.5. Os resultados mostraram que haverá uma tendência crescente do potencial fotovoltaico para o leste da Ásia, Europa, África Central, parte norte da América do Sul, América Central e especialmente no centro e leste da China. Por outro lado, no Norte da África, na Ásia Central, na Austrália e especialmente no Planalto Tibetano, os autores observam tendências decrescentes no potencial fotovoltaico.

2.4. Conclusão

A partir da revisão sistemática a respeito de como as mudanças climáticas impactarão a produção energética solar e eólica no futuro, nota-se que a maioria dos estudos foram realizados para a Europa e a energia eólica foi a mais estudada. Percebe-se também que os estudos referentes a esta temática estão aumentando, provavelmente pela crescente preocupação em realizar um planejamento energético eficaz diante das alterações no clima.

Por sua vez, nota-se a diferença de resultados obtidos ao se utilizar diferentes bases de dados bibliográficos e a importância de levar em consideração mais do que uma fonte de pesquisa a fim de obter uma maior diversificação da teoria, das discussões e resultados.

Depreende-se que as alterações climáticas futuras causarão mudanças no potencial solar e eólico e essas alterações podem apresentar impactos significativos em boa parte do planeta. Notou-se que a utilização de modelos climáticos distintos pode gerar resultados diferentes para uma mesma região estudada. Sendo assim, é importante levar em

consideração os resultados de diferentes modelos climáticos globais e regionais, e com isso diminuir as incertezas geradas e atribuir uma maior confiabilidade aos resultados obtidos.

2.5. Referências

ANGELES, M. E.; GONZALEZ, J. E.; ERICKSON III, D.; HERNÁNDEZ, J. L. The Impacts of Climate Changes on the Renewable Energy Resources in the Caribbean. **Journal of Solar Energy Engineering-Transactions of The Asme**, v. 132, p. 1–13, 2010.

BARSTAD, I.; SOTERBERG, A.; MESQUITA, M. S. Present and future offshore wind power potential in northern Europe based on downscaled global climate runs with adjusted SST and sea ice cover. **Renewable Energy**, v. 44, p. 398–405, 2012.

BARTÓK, B.; WILD, M.; FOLINI, D.; LUTHI, D.; KOTLARSKI, S.; SCHAR, C.; VAUTARD, R.; JEREZ, S.; IMECS, Z. 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.

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.

CHANG, T. J.; CHEN, C. L.; TU, Y.; YEH, H.; WU, Y. Evaluation of the climate change impact on wind resources in Taiwan Strait. **Energy Conversion and Management**, v. 95, p. 435–445, 2015.

CHEN, L. Impacts of climate change on wind resources over North America based on NA-CORDEX. **Renewable Energy**, v. 153, p. 1428-1438, 2020.

COSTOYA, X.; CASTRO, M DE.; SANTOS, F.; SOUSA, M. C.; GÓMEZ-GESTEIRA, M. Projections of wind energy resources in the Caribbean for the 21st century. **Energy**, v. 178, p. 356–367, 2019.

COSTOYA, X.; CASTRO, M DE.; CARVALHO, D.; GÓMEZ-GESTEIRA, M. On the suitability of offshore wind energy resource in the United States of America for the 21st century. **Applied Energy**, v. 262, n. January, 2020.

DAVY, R.; GNATIUK, N.; PETTERSON, L.; BOBYLEV, L. Climate change impacts on wind energy potential in the European domain with a focus on the Black Sea. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, n. January 2017, p. 1652–1659, 2018.

DE JONG, P.; BARRETO, T. B.; TANAJURA, C. A. S.; KOULOUKOU, D.; ESQUERRE-OLIVEIRA, K. P.; KIPERSTOK, A.; TORRES, E. A. 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.

FANT, C.; SCHLOSSER, C. A.; STRZEPEK, K. The impact of climate change on wind

power production in southern Africa. **Applied Energy**, v. 1, p. 556–564, 2016.

GAO, Y.; MA, S.; WANG, T. The impact of climate change on wind power abundance and variability in China. **Energy**, v. 189, 2019.

GONÇALVES-AGEITOS, M.; BARRERA-ESCODA, A.; BALDASANO, J. M.; CUNILLERA, J. Modelling wind resources in climate change scenarios in complex terrains. **Renewable Energy**, v. 76, p. 670–678, 2015.

GONZÁLEZ, A.; PÉREZ, J. C.; DÍAZ, J. P.; EXPÓSITO, F. J. Future projections of wind resource in a mountainous archipelago, Canary Islands. **Renewable Energy**, v. 104, p. 120–128, 2017.

GUNDERSON, I.; GOYETTE, S.; GAGO-SILVA, A.; QUIQUEREZ, L.; LEHMANN, A. Climate and land-use change impacts on potential solar photovoltaic power generation in the Black Sea region. **Environmental Science and Policy**, v. 46, p. 70–81, 2015.

GUO, J. HUANG, G.; WANG, X.; XU, Y.; LI, Y. Projected changes in wind speed and its energy potential in China using a high-resolution regional climate model. **Wind Energy**, n. May 2019, p. 471–485, 2019.

HDIDOUAN, D.; STAFFELL, I. The impact of climate change on the levelised cost of wind energy. **Renewable Energy**, v. 101, n. June, p. 575–592, 2017.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge University Press; 2014.

JACOB, D.; PETERSEN, J.; EGGERT, B.; ALIAS, A.; CHRISTENSEN, O. B.; BOUWER, L. M.; BRAUN, A.; COLETTE, A.; DÉQUÉ, M.; GEORGIEVSKI, G.; GEORGIOPOLOU, E.; GOBIET, A.; MENUT, L.; NIKULIN, G.; HAENSLER, A.; HEMPELMANN, N.; JONES, C.; KEULER, K.; KOVATS, S.; KRÖNER, N.; KOTLARSKI, S.; KRIEGSMANN, A.; MARTIN, E.; MEIJGAARD, E. V.; MOSELEY, C.; PFEIFER, S.; PREUSCHMANN, S.; RADERMACHER, C.; RADTKE, K.; RECHID, D.; ROUNSEVELL, M.; SAMUELSSON, SOMOT, S.; SOUSSANA, J.; TEICHMANN, C.; VALENTINI, R.; VAUTARD, R.; WEBER, B.; YIOU, P. EURO-CORDEX: New high-resolution climate change projections for European impact research. **Regional Environmental Change**, v. 14, n. 2, p. 563–578, 2014.

JIA, G., SHEVLIAKOVA, E.; ARTAXO, P.; NOBLET-DUCOUDRÉ, N. De.; HOUGHTON, R.; HOUSE, J.; KITAJIMA, K.; LENNARD, C.; POPP A.; SIRIN, A.; SUKUMAR, R.; VERCHOT, L. 2019: Land–climate interactions. In: *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems* [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)]. In press.

JOHNSON, D. L.; ERHARDT, R. J. Projected impacts of climate change on wind energy

density in the United States. **Renewable Energy**, v. 85, 2016.

KOLETSIS, I.; KOTRONI, V.; LAGOUVARDOS, K.; SOUKISSIAN, T. Assessment of offshore wind speed and power potential over the Mediterranean and the Black Seas under future climate changes. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 60, p. 234–245, 2016.

KATOPODIS, T.; MARKANTONIS, I.; POLITI, N.; VLACHOGIANNIS, D.; SFETSOS, A. High-resolution solar climate atlas for Greece under climate change using the weather research and forecasting (WRF) model. **Atmosphere**, v. 11, n. 7, p. 1–17, 2020.

LIZUMA, L.; AVOTNIECE, Z.; RUPAINIS, S.; TEILANS, A. Assessment of the Present and Future Offshore Wind Power Potential: A Case Study in a Target Territory of the Baltic Sea Near the Latvian Coast. **The Scientific World Journal**, v. 2013, p. 1–10, 2013.

LUCENA, A. F. P. DE, SCHAEFFER, R.; SZKLO, A. S. Least-cost adaptation options for global climate change impacts on the Brazilian electric power system. **Global Environmental Change**, v. 20, n. 2, p. 342–350, 2010.

MARENGO, J. A.; CHOU, S. C.; KAY, G.; ALVES, L. M.; PESQUERO, J. F.; SOARES, W. R.; SANTOS, D. C.; LYRA, A. A.; SUEIRO, G.; BETTS, R.; CHAGAS, D. J.; GOMES, L. L.; BUSTAMANTE, J. F.; TAVARES, P. Development of regional future climate change scenarios in South America using the Eta CPTEC/HadCM3 climate change projections: Climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Paraná River basins. **Climate Dynamics**, v. 38, n. 9–10, p. 1829–1848, 2012.

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.

MATTHEW, O. J.; OHUNAKIN, O. S. Simulating the effects of climate change and afforestation on wind power potential in Nigeria. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 22, p. 41–54, 2017.

MOEMKEN, J.; REYES, M.; FELDMANN, H.; PINTO, J. G. Future Changes of Wind Speed and Wind Energy Potentials in EURO-CORDEX Ensemble Simulations. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 123, n. 12, p. 6373–6389, 2018.

MONFORTI, F.; GAETANI, M.; VIGNATI, E. How synchronous is wind energy production among European countries? **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 59, p. 1622–1638, 2016.

MÜLLER, J.; FOLINI, D.; WILD, M.; PFENNINGER, S. CMIP-5 models project photovoltaics are a no-regrets investment in Europe irrespective of climate change. **Energy**, v. 171, p. 135–148, 2019.

NOAA. National Oceanic and Atmospheric Administration. The First Climate Model. 2017. Disponível em: http://celebrating200years.noaa.gov/breakthroughs/climate_model/. Acesso em: 11/10/2020.

NYASIMI, M. Review of Targets for the Sustainable Development Goals: The Science Perspective. **Journal of Education for Sustainable Development**, v. 9, n. 2, p. 237–237, 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.

OKA, K.; MIZUTANI, W.; ASHINA, S. Climate change impacts on potential solar energy production: A study case in Fukushima, Japan. **Renewable Energy**, v. 153, p. 249–260, 2020.

PAN, Z.; SEGAL, M.; ARRIT, R. W.; TAKLE, E. S. On the potential change in solar radiation over the US due to increases of atmospheric greenhouse gases. **Renewable Energy**, v. 24, n. 2, p. 235–243, 2001.

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.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; PES, M. P.; CRUZ SEGUNDO, E. I DA.; LYRA, A DE A. The impacts of global climate changes on the wind power density in Brazil. **Renewable Energy**, v. 49, p. 107–110, 2013.

PÉREZ, J. C.; GONZÁLEZ, A.; DÍAZ, J. P.; EXPÓSITO, F. J.; FELIPE, J. Climate change impact on future photovoltaic resource potential in an orographically complex archipelago, the Canary Islands.. **Renewable Energy**, v. 133, p. 749–759, 2019.

PRYOR, S. C.; BARTHELMIE, R. J.; KJELLSTRÖM, E. Potential climate change impact on wind energy resources in northern Europe: Analyses using a regional climate model. **Climate Dynamics**, v. 25, n. 7–8, p. 815–835, 2005.

PRYOR, S. C.; BARTHELMIE, R. J.; SCHOOF, T. J. Inter-annual Variability of Wind Indices across Europe. **Wind Energy**, n. December 2005, p. 27–38, 2006.

QUEIROZ, A. R DE.; LIMA, L. M. M.; LIMA, J. W. M.; SILVA, B. C DE.; 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.

RATJIRANUKOOL, S.; RATJIRANUKOOL, P. Wind Speed Projections for Electricity Application over Thailand. **Energy Procedia**, v. 79, p. 423–429, 2015.

RAVESTEIN, P.; SCHRIER, V. D.; HAARSMA, 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, n. October 2017, p. 497–508, 2018.

RUFFATO-FERREIRA, V.; BARRETO, R DA. C.; OSCAR JÚNIOR, A.; SILVA, L. W.;

VIANA, D DE. B.; NASCIMENTO, J. A S DO.; FREITAS, M. A. V DE. 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, n. October 2015, p. 1124–1137, 2017.

RUSU, E. A 30-year projection of the future wind energy resources in the coastal environment of the Black Sea. **Renewable Energy**, v. 139, p. 228–234, 2019.

RUSU, E. An evaluation of the wind energy dynamics in the Baltic Sea, past and future projections. **Renewable Energy**, v. 160, p. 350–362, 2020.

SAILOR, D. J.; SMITH, M.; HART, M. Climate change implications for wind power resources in the Northwest United States. **Renewable Energy**, v. 33, n. 11, p. 2393–2406, 2008.

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, n. 2015, p. 68–80, 2015.

SANTOS, F.; GÓMEZ-GESTEIRA, M.; CASTRO, M DE.; AÑEL, J. A.; CARVALHO, D.; COSTOYA, X.; DIAS, J.M. 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.

SAWADOGO, W.; REBOITA, M. S.; FAYE, A.; ROCHA, R. P DA.; ODOULAMI, R. C.; OLUSEGUN, C. F.; ADENIYI, M. O.; ABIODUN, B. J.; SYLLA, M. B.; DIALLO, I.; COPPOLA, E.; GIORGI, F. Current and future potential of solar and wind energy over Africa using the RegCM4 CORDEX-CORE ensemble. **Climate Dynamics**, 2020a.

SAWADOGO, W.; ABIODUN, B. J, OKOGBUE, E. C. Impacts of global warming on photovoltaic power generation over West Africa. **Renewable Energy**, v. 151, p. 263–277, 2020b.

SCHLOTT, M.; KIES, A.; BROWN, T.; SCHRAMM, S.; GREINER, M. The impact of climate change on a cost-optimal highly renewable European electricity network. **Applied Energy**, v. 230, n. June, p. 1645–1659, 2018.

SHEN, M.; CHEN, J.; ZHUAN, M; CHEN, H.; XU, C.; XIONG, L. Estimating uncertainty and its temporal variation related to global climate models in quantifying climate change impacts on hydrology. **Journal of Hydrology**, v. 556, p. 10–24, 2018.

SILANG, A.; UY, S. N.; DADO, J. M.; CRUZ, F. A.; NARISMA, G.; LIBATIQUE, N.; TANGONAN, G. Wind energy projection for the Philippines based on climate change modeling. **Energy Procedia**, v. 52, p. 26–37, 2014.

SOARES, P. M. M; LIMA, D. C. A.; CARDOSO, R. M.; NASCIMENTO, M. L.; SEMEDO, A. Western Iberian offshore wind resources: More or less in a global warming climate? **Applied Energy**, v. 203, n. 2017, p. 72–90, 2017.

SOLAUN, K.; CERDÁ, E. Impacts of climate change on wind energy power – Four wind farms in Spain. **Renewable Energy**, v. 145, p. 1306–1316, 2020.

VIVIESCAS, C.; LIMA, L.; DIUANA, F. A.; VASQUEZ, E.; LUDOVIQUE, C.; SILVA, G. N.; HUBACK, V.; MAGALAR, L.; SZKLO, A.; LUCENA, A. F. P.; SCHAEFFER, R.; PAREDES, J. R. Contribution of Variable Renewable Energy to increase energy security in Latin America: Complementarity and climate change impacts on wind and solar resources. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 113, n. November 2017, 2019.

WACHSMUTH, J.; BLOHM, A.; GÖBLING-REISEMANN, s.; EICKEMEIER, T.; GASPER, R.; STÜHRMANN, S. 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.

WANG, M.; ULLRICH, P.; MILLSTEIN, D. The future of wind energy in California : Future projections with the Variable-Resolution CESM. **Renewable Energy**, v. 127, p. 242–257, 2018.

WANG, S.; ZHU, J.; HUANG, G.; BAETZ, B.; CHENG, G.; ZENG, X.; WANG, X. Assessment of climate change impacts on energy capacity planning in Ontario, Canada using high-resolution regional climate model. **Journal of Cleaner Production**, v. 274, p. 123026, 2020.

WEBER, J.; GOTZENS, F.; WITTHAUT, D. Impact of strong climate change on the statistics of wind power generation in Europe. **Energy Procedia**, v. 153, p. 22–28, 2018.

WOO, S.; SINGH, G. P.; OH, A.; LEE, K. Projected changes in summer precipitation over East Asia with a high-resolution atmospheric general circulation model during 21st century. **International Journal of Climatology**, v. 38, n. 12, p. 4610–4631, 2018.

ZHANG, F.; WANG, C.; XIE, G.; KONG, W.; JIN, S.; HU, J.; CHEN, X. Projection of global wind and solar resources over land in the 21st century. **Global Energy Interconnection**, v. 1, n. 4, p. 443–451, 2018.

ZOU, L.; WANG, L.; LI, J.; LU, Y.; GONG, W.; NIU, Y. Global surface solar radiation and photovoltaic power from Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 climate models. **Journal of Cleaner Production**, v. 224, p. 304–324, 2019.

CAPÍTULO 3

PROJEÇÕES CLIMÁTICAS DE TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA DO AR PARA A REGIÃO NORDESTE DO BRASIL A PARTIR DE UM CONJUNTO DE MODELOS CLIMÁTICOS

Resumo

Os efeitos das mudanças climáticas já são perceptíveis por toda a sociedade, por exemplo, os já observados aumentos nas temperaturas do ar e alterações nos regimes de chuvas em diversas áreas do planeta são indícios claros de que o clima está passando por alterações. Com a crescente preocupação de entender como o clima se comportará nas próximas décadas foram desenvolvidos modelos climáticos globais (GCM) e regionais (RCM). Os modelos são capazes de projetar as condições climáticas futuras, levando em consideração elementos e fatores climáticos e suas interações. No presente trabalho, utilizaram-se os modelos climáticos globais BESM, HadGEM2-ES e CanESM2 associados ao modelo climático regional Eta e realizou-se projeções da temperatura máxima, média e mínima do ar e umidade relativa do ar para os períodos de 2041-2069 e 2070-2099 a partir dos cenários RCP4.5 e RCP8.5 para toda a região Nordeste do Brasil. Os resultados evidenciaram o aumento das temperaturas futuras, o que poderá gerar uma série de adversidades para a região. Além disso, a redução predominante da umidade relativa do ar poderá ser um fator para contribuir com a seca em uma região já bastante afetada pela escassez hídrica.

Palavras-chave: Mudanças climáticas, cenário RCP4.5, cenário RCP8.5, GCM, RCM

Abstract

The effects of climate change are already noticeable across society, for example, the already observed increases in air temperatures and changes in rainfall patterns in different areas of the planet are clear indications that the climate is undergoing changes. With the growing concern to understand how the climate will behave in the coming decades, global (GCM) and regional (RCM) climate models have been developed. The models are capable of projecting future climatic conditions, taking into account climatic elements and factors and their interactions. In the present work, the global climate models BESM, HadGEM2-ES and CanESM2 associated with the Eta regional climate model were used and projections of the maximum, average and minimum air temperature and relative humidity for the periods from 2041-2069 were carried out. and 2070-2099 from the scenarios RCP4.5 and RCP8.5 for the entire Northeast region of Brazil. The results showed an increase in future temperatures, which may generate a series of adversities for the region. In addition, the predominant reduction in the relative humidity of the air may be a factor in contributing to drought in a region that is already severely affected by water scarcity.

Keywords: Climate changes, RCP4.5 scenario, RCP8.5 scenario, GCM, RCM.

3.1. Introdução

O relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) publicado em 2019 volta a evidenciar o aumento das temperaturas globais. Além disso, o documento destaca o aumento da frequência das secas na Amazônia, na região Nordeste do Brasil, na costa leste dos Estados Unidos, na Patagônia, na maior parte da África, em regiões do Mediterrâneo e no nordeste da China (JIA *et al.*, 2019).

Diante da necessidade de projetar o comportamento climático futuro foram desenvolvidos os modelos climáticos. O primeiro modelo de circulação geral, o qual associava os processos oceânicos e atmosféricos, foi desenvolvido em Princeton (Estados Unidos) ao final da década de 60 no Laboratório de Dinâmica de Fluidos Geofísicos da NOAA (NOAA, 2017).

A partir de informações sobre a região e as interações entre solo, água e atmosfera, os modelos climáticos são capazes de projetar dados futuros para temperatura do ar, precipitação, umidade relativa do ar e outros parâmetros tendo em vista as mudanças climáticas (QUEIROZ *et al.*, 2016). Associados aos modelos climáticos utilizam-se os Caminhos Representativos de Concentração (RCP) apresentados nos relatórios do IPCC, sendo divididos em RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 e RCP8.5, os quais correspondem ao forçamento radioativo de $2,6 \text{ Wm}^{-2}$, $4,5 \text{ Wm}^{-2}$, $6,0 \text{ Wm}^{-2}$ e $8,5 \text{ Wm}^{-2}$, respectivamente. Os RCP caracterizam os cenários climáticos futuros, tendo em vista potenciais concentrações de gases do efeito estufa e o forçamento radioativo, sendo o RCP2.6 o mais otimista em relação às concentrações futuras e o RCP8.5 o mais pessimista (HDIDOUAN; STAFFELL, 2017; MÜLLER *et al.*, 2019).

Projeções realizadas em regiões de todo o planeta investigaram e avaliaram que mudanças estão ocorrendo no clima. Shen *et al.* (2018) projetaram a elevação da temperatura e da precipitação para a Bacia Hidrográfica do Rio Hanjiang, na região centro-sul da China. Para a região do leste Asiático Woo *et al.* (2018) as projeções indicaram o aumento da temperatura para toda a região enquanto a precipitação e a umidade relativa do ar apresentaram uma variabilidade. Matthew e Ohunakin (2017) observaram indícios de aumento futuro da temperatura do ar para toda a Nigéria.

Na Europa, Jacob *et al.* (2014) projetaram que a maior elevação da temperatura média anual ocorrerá no sul e nordeste do continente. As regiões do norte da Escandinávia,

Europa Oriental e Cordilheira Alpina podem alcançar aquecimento acima de 4,5°C no cenário RCP8.5 no período de 2071-2100 em comparação com o período de 1971-2000.

Os estudos realizados para o Brasil por Marengo *et al.* (2012) projetaram aumento da temperatura e redução da precipitação para a maior parte do país. No caso de Marengo e Bernasconi (2015) as projeções indicaram o aumento da temperatura e declínio da precipitação na parte ocidental e na região semiárida do Nordeste do Brasil, assim como a diminuição da umidade relativa do ar.

Dessa forma, o presente trabalho teve como propósito projetar as condições de temperatura do ar (média, máxima e mínima) e umidade relativa do ar especificamente para a região Nordeste do Brasil, aplicando um conjunto de três modelos climáticos globais associados a um modelo climático regional. Comparou-se o período de referência, 1961-1990, aos períodos futuros de 2041-2069 e 2070-2099 utilizando os cenários RCP4.5 e RCP8.5 do IPCC.

3.2. Metodologia

3.2.1. Caracterização da área de estudo

A região Nordeste do Brasil tem uma área territorial de aproximadamente 1.552.167,01 km² e população estimada em 57.374.243 pessoas em 2020 divididas em nove estados (Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Bahia) (IBGE, 2019; IBGE, 2020).

Pela classificação de Köppen-Geiger (Figura 3.1), o clima da região Nordeste divide-se em tropical (zona A), árido (zona B) e subtropical úmido (zona C). A zona A subdivide-se em Af (tropical úmido), Am (tropical de monção), Aw (tropical com inverno seco) e As (tropical com verão seco). O tipo climático árido (Zona B) também caracteriza uma importante área do Nordeste por meio do subtipo Bs (semiárido). O clima subtropical úmido (Zona C) é encontrado em uma pequena parte do estado da Bahia (ALVARES *et al.*, 2013).

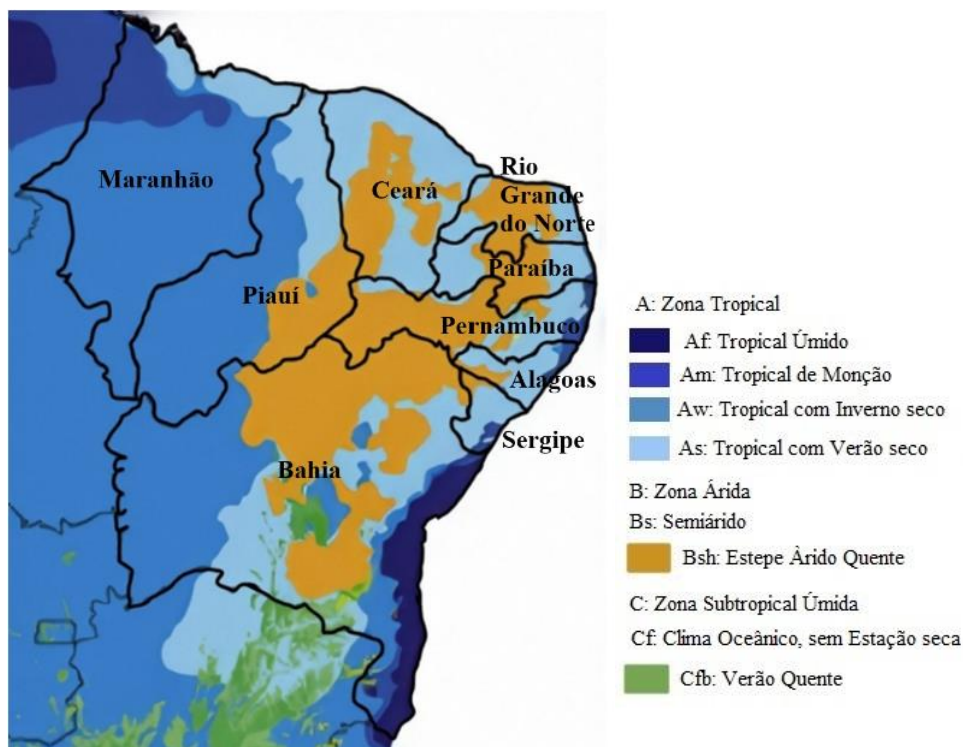


Figura 3.1: Classificação climática para a região Nordeste do Brasil de acordo com Köppen-Geiger. Fonte: Adaptado de Kottek, Grieser e Beck (2006) e Alvares *et al.* (2013).

A temperatura do ar no Nordeste alcança valores médios elevados, os quais variam entre 20°C e 28°C. Nas áreas de baixa altitude e na costa as temperaturas ficam entre 24°C e 26°C. Em contrapartida, localidades que estão acima de 200 m de altitude podem atingir médias anuais abaixo dos 20°C (LIMA *et al.*, 2019; COSTA *et al.*, 2020).

3.2.2. Dados dos modelos climáticos

Os dados de projeção foram obtidos utilizando três modelos climáticos globais (GCM's): BESM (Modelo Brasileiro do Sistema Terrestre), HadGEM2-ES (*Hadley Global Environment Model 2 - Earth System*) e CanESM2 (*Second Generation Canadian Earth System Model*) (ANEXO I) associados ao modelo climático regional RCM Eta, obtidos pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC-INPE) pela plataforma do Projeta (CHOU *et al.*, 2014a; CHOU *et al.*, 2014b; BRAZIL, 2016; LYRA *et al.*, 2017).

O modelo brasileiro BESM foi desenvolvido pelo INPE. Este modelo se baseia na estrutura do modelo acoplado oceano-atmosfera do CPTEC usado para previsões estendidas de tempo e clima sazonal (VEIGA *et al.*, 2019). Este modelo está acoplado ao modelo oceânico MOM4 (*Modular Ocean Model 4*) e os processos da superfície da terra são representados pelo modelo SSIB (Modelo Simples da Biosfera). Além disso, levam em

consideração o gelo marinho e a vegetação (CHOU *et al.*, 2014a). Tendo por objetivo gerar cenários levando em consideração a perspectiva brasileira, o modelo BESM incorpora o processo de formação das nuvens, a dinâmica da vegetação e como os biomas brasileiros influenciam no clima global (BESM, 2021).

O HadGEM2-ES é a segunda versão do HadGEM que traz melhorias sobre erros encontrados no HadGEM1, entre elas, uma estratosfera bem resolvida e componentes do sistema terrestre integrando o ciclo de carbono terrestre e oceânico e a química da atmosfera (MARTIN *et al.*, 2011). As melhorias também foram observadas, principalmente nos trópicos, sobretudo na precipitação total, umidade, quantidade de nuvens e propriedades radiativas (MARTIN *et al.*, 2011).

O modelo CanESM2 é integrado pelo modelo físico-oceânico-atmosfera (CanCM4), acoplado a um modelo de carbono terrestre (CTEM) e um modelo de carbono oceânico (CMOC) (SOSPEDRA-ALFONSO; MERRYFIELD, 2017).

Por fim, o RCM Eta, o qual foi desenvolvido pela Universidade de Belgrado juntamente ao Instituto de Hidrometeorologia da Iugoslávia e foi operacionalizado no *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) (RUFFATO-FERREIRA *et al.*, 2017). O modelo regional Eta, por ser sensível a áreas montanhosas, é adequado para estudos em áreas de topografia íngreme, como a Cordilheiras dos Andes na América do Sul. Os processos de superfície terrestre são representados pelo esquema 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 curtas é representada em Lacis e Hansen (1974), e a radiação de ondas longas em Fels e Schwarzkopf (1975).

As condições climáticas futuras foram representadas por dois cenários dos Caminhos Representativos de Concentração, o RCP4.5 e o RCP8.5, do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2014). O RCP4.5 é um cenário um pouco mais otimista, onde iniciativas seriam tomadas para limitar a emissão de gases do efeito estufa na atmosfera e estabilizar a forçante em $4,5 \text{ Wm}^{-2}$ (THOMSON *et al.*, 2011). Por sua vez, o RCP8.5 é o cenário mais pessimista, com alta emissão de gases do efeito estufa e nenhuma iniciativa específica para mitigação dos impactos climáticos. Neste cenário, o forçamento radioativo alcançaria $8,5 \text{ Wm}^{-2}$ até o final do século XXI (RIAHY *et al.*, 2011).

Os dados de projeção utilizados neste trabalho consideraram o período de referência 1961-1990, por ser considerada uma normal climatológica de referência, e os

períodos futuros de 2041-2069 e 2070-2099. Foram analisadas as projeções para as temperaturas máxima, média e mínima do ar e umidade relativa do ar na região Nordeste do Brasil espalhadas por 3237 pontos, os quais estão a uma distância de aproximadamente 22,3 km um do outro.

Os mapas foram gerados utilizando o software Qgis, versão 3.8, a partir dos dados geográficos obtidos no Instituto Geográfico de Geografia e Estatística (IBGE), interpolados pelos dados climáticos projetados nos modelos.

3.3. Resultados e Discussão

3.3.1. Temperatura média, mínima e máxima do ar

Na Tabela 3.1 pode-se observar que os resultados para o cenário RCP8.5 (2070-2099) apresentaram as projeções mais elevadas para as temperaturas em todos os modelos utilizados. Os valores mais expressivos foram observados no modelo Eta-CanESM2 para a temperatura máxima do ar com anomalia de 5,8°C. O modelo Eta-HadGEM2-ES apresentou resultados bem próximos a esse (5,7°C) e para temperaturas média e mínima do ar os resultados foram de 5,1°C e 4,6°C de aumento, respectivamente.

No caso do modelo Eta-BESM as médias de anomalias para as temperaturas ficaram abaixo das projetadas pelos outros dois modelos, sendo inferior a 1°C para a temperatura máxima do ar no cenário RCP4.5 (Tabela 3.1). Segundo Capistrano *et al.* (2018) o modelo BESM costuma projetar aumentos de temperatura mais baixos do que outros modelos climáticos, principalmente nas áreas continentais.

A partir do cálculo do desvio padrão, entende-se que os resultados estão próximos à média, demonstrando uma baixa variabilidade dos dados. Observa-se que as médias dos resultados nos modelos são bastante próximos (Tabela 3.1).

Tabela 3.1: Média das anomalias das temperaturas do ar (°C) médias, máximas e mínimas anuais e desvio padrão (DP) quando comparados o período histórico com o período futuro de 2041-2069 e 2070-2099 nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 para a região Nordeste do Brasil.

	Temperatura média do ar					
	Eta-BESM		Eta-HadGEM2-ES		Eta-CanESM2	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP
RCP 4.5 (2041-2069)	1,0	0,4	2,1	0,2	2,3	0,4
RCP 4.5 (2070-2099)	1,3	0,4	2,8	0,3	2,7	0,5
RCP 8.5 (2041-2069)	1,7	0,3	3,2	0,5	2,9	0,6
RCP 8.5 (2070-2099)	2,9	0,3	5,1	0,7	4,4	1,2
Valores Médios	1,7	0,4	3,3	0,4	3,1	0,7
	Temperatura mínima do ar					
	Eta-BESM		Eta-HadGEM2-ES		Eta-CanESM2	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP
RCP 4.5 (2041-2069)	1,5	0,5	2,1	0,1	1,9	0,3
RCP 4.5 (2070-2099)	1,8	0,5	2,6	0,2	2,3	0,4
RCP 8.5 (2041-2069)	2,0	0,4	2,9	0,4	2,3	0,5
RCP 8.5 (2070-2099)	3,0	0,3	4,6	0,5	3,0	0,8
Valores Médios	2,1	0,4	3,1	0,3	2,4	0,5
	Temperatura máxima do ar					
	Eta-BESM		Eta-HadGEM2-ES		Eta-CanESM2	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP
RCP 4.5 (2041-2069)	0,3	0,5	1,9	0,3	2,4	0,4
RCP 4.5 (2070-2099)	0,6	0,5	3,0	0,4	3,3	0,6
RCP 8.5 (2041-2069)	1,4	0,5	3,8	0,6	3,5	0,8
RCP 8.5 (2070-2099)	2,8	0,5	5,7	1,0	5,8	1,5
Valores Médios	1,3	0,5	3,6	0,6	3,8	0,8

As mudanças para temperatura média, mínima e máxima do ar anual projetadas nos modelos Eta-BESM, Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 podem ser observadas detalhadamente na Figura 3.2, Figura 3.3 e Figura 3.4. Como previsto, o cenário RCP8.5 (mais pessimista) apresentou aumentos de temperatura maiores do que os observados no cenário RCP4.5, sendo os resultados mais elevados para o final do século XXI. Apesar disso, em algumas áreas localizadas nos estados da Bahia, Alagoas e Sergipe, e apenas no modelo Eta-CanESM2, as projeções indicaram aumento maior da temperatura mínima do ar no cenário mais otimista em 2070-2099 (Figura 3.3).

Sob os cenários RCP4.5 e RCP8.5, em ambos os períodos futuros, as projeções indicaram aumentos mais altos para a temperatura máxima do ar no cenário mais pessimista em 2070-2099 e de forma mais expressiva nos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2. Todavia, no cenário mais otimista no modelo Eta-BESM, inesperadamente observou-se uma possível redução da temperatura máxima do ar em áreas pontuais na região Nordeste do Brasil (Figura 3.4).

O estudo realizado por Marengo e Bernasconi (2015) descreveu o aquecimento de 2°C (2010-2040) e aumento entre 2°C a 4°C na área semiárida do Nordeste (2041-2070), com resultados de elevação acima dos 4°C para o final do século XXI, a partir das projeções realizados com o modelo Eta-HadCM3. Os resultados são semelhantes aos observados no presente artigo. No modelo Eta-BESM, aumento acima de 2°C foi projetado para temperatura média e mínima do ar no RCP8.5 em 2070-2099 para todo Nordeste. O mesmo ocorreu no modelo Eta-HadGEM2-ES, neste caso, para as temperaturas média, mínima e máxima do ar no cenário mais pessimista e sob o RCP4.5 para o final do século XXI. Além disso, observou-se aumento superior a 3,5°C das temperaturas no RCP8.5 e somente para 2070-2099 no modelo Eta-HadGEM2-ES. No entanto, as projeções realizadas por Marengo, Torres e Alves (2017) geraram resultados de aumento acima de 5°C no RCP8.5 em 2071-2100 para a mesma região utilizando um conjunto de modelos climáticos do CMIP5.

As projeções para 31 localidades no Brasil, incluindo localidades nos estados do Maranhão, Piauí e da Bahia realizadas por Bender e Sentelhas (2018) mostraram aumento das temperaturas mínima e máxima do ar para áreas na região Norte e Nordeste quando comparado o período histórico (1980-2009) com os futuros (2040-2060 e 2070-2099). No caso de Silva *et al.* (2019a), os autores identificaram que ao se comparar o período histórico (1976-2005) com o futuro (2021-2050 e 2071-2100) poderá ocorrer o aumento da temperatura no cerrado brasileiro, sendo de forma mais intensa ao final do século XXI no RCP8.5.

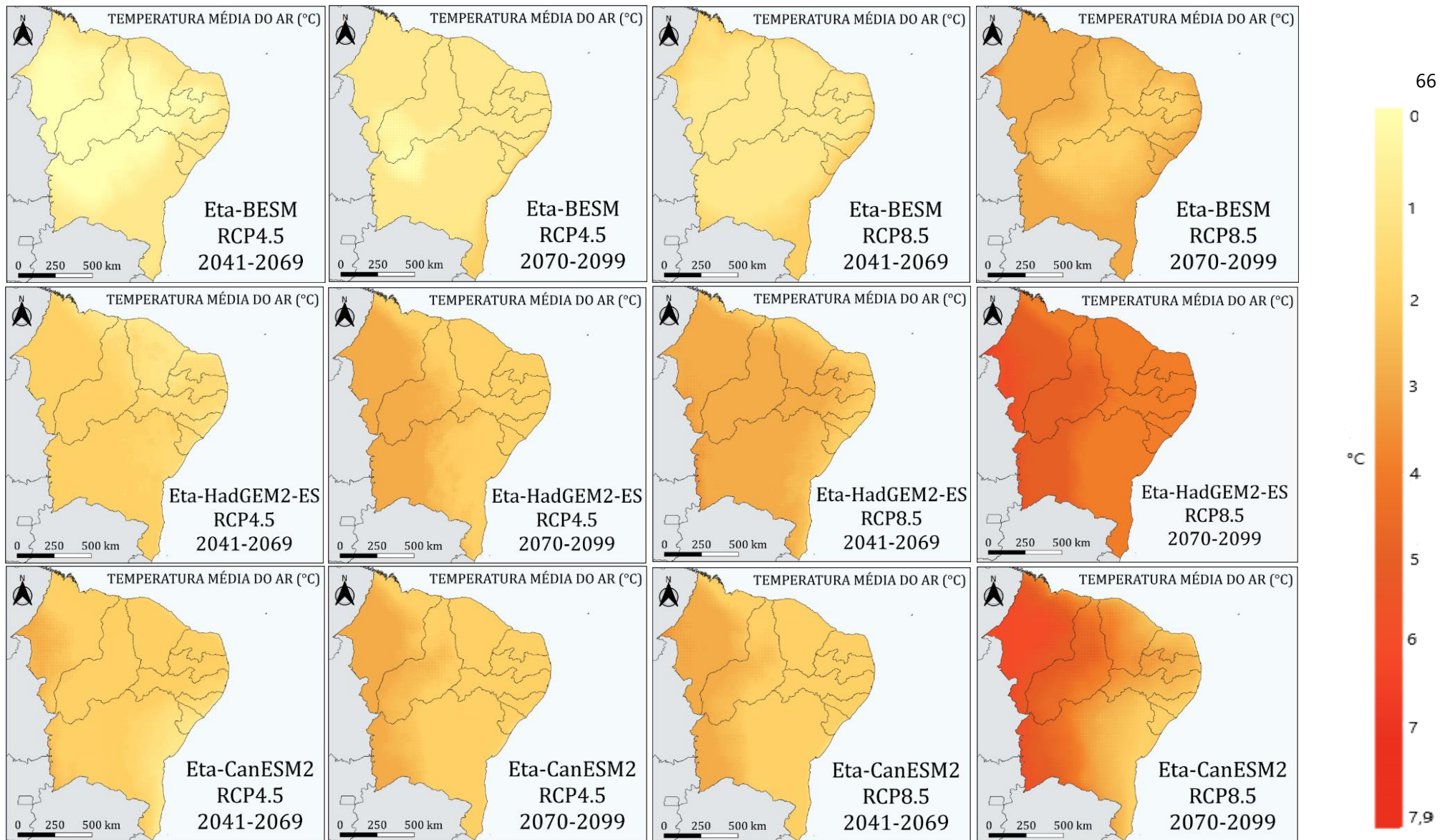


Figura 3.2: Anomalias para temperatura média anual nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 nos períodos de 2041-2069 e 2070-2099 a partir dos modelos Eta-BESM, Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 na região Nordeste do Brasil

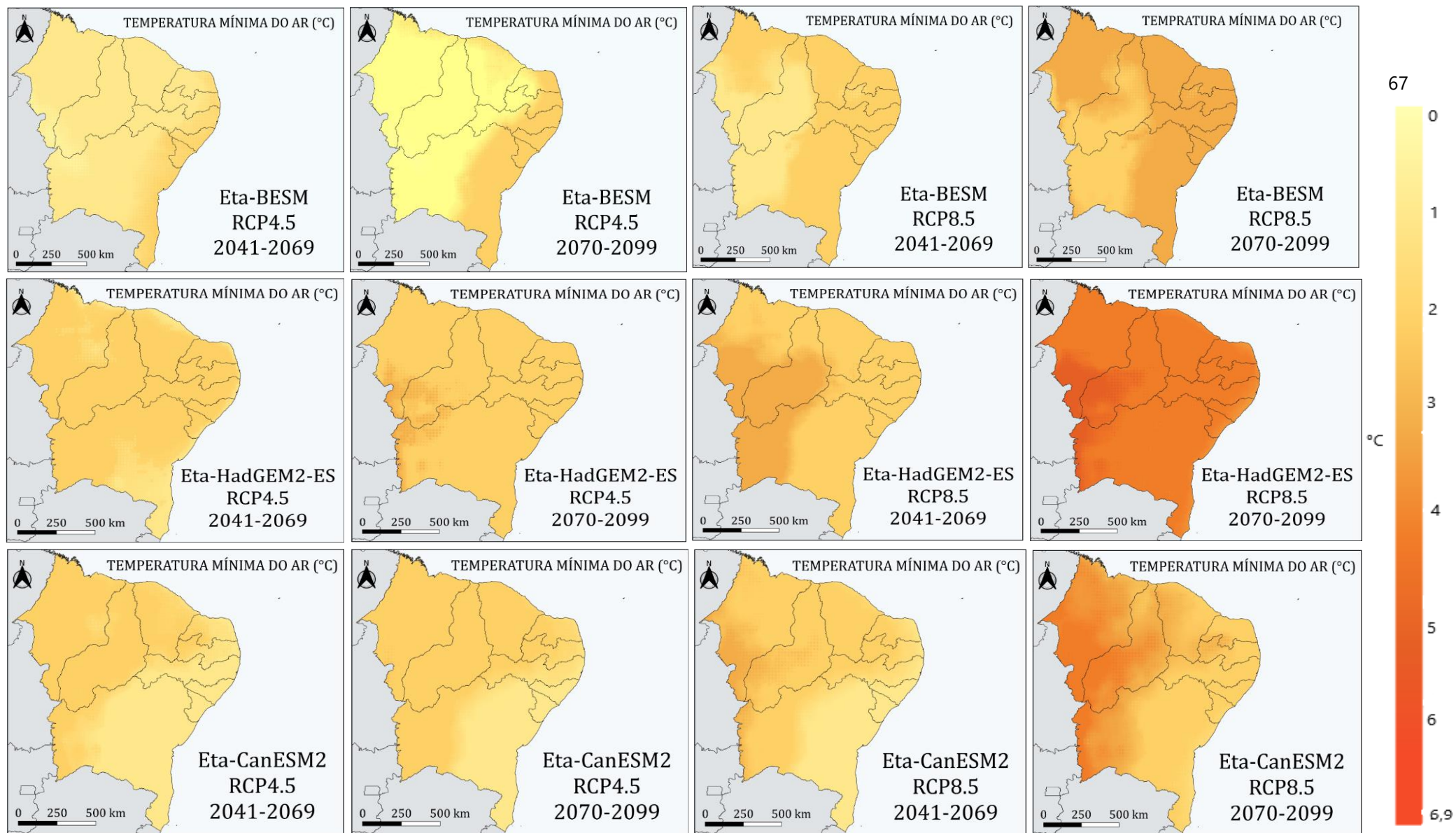


Figura 3.3: Anomalias para temperatura mínima anual nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 nos períodos de 2041-2069 e 2070-2099 a partir dos modelos Eta-BESM, Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 na região Nordeste do Brasil.

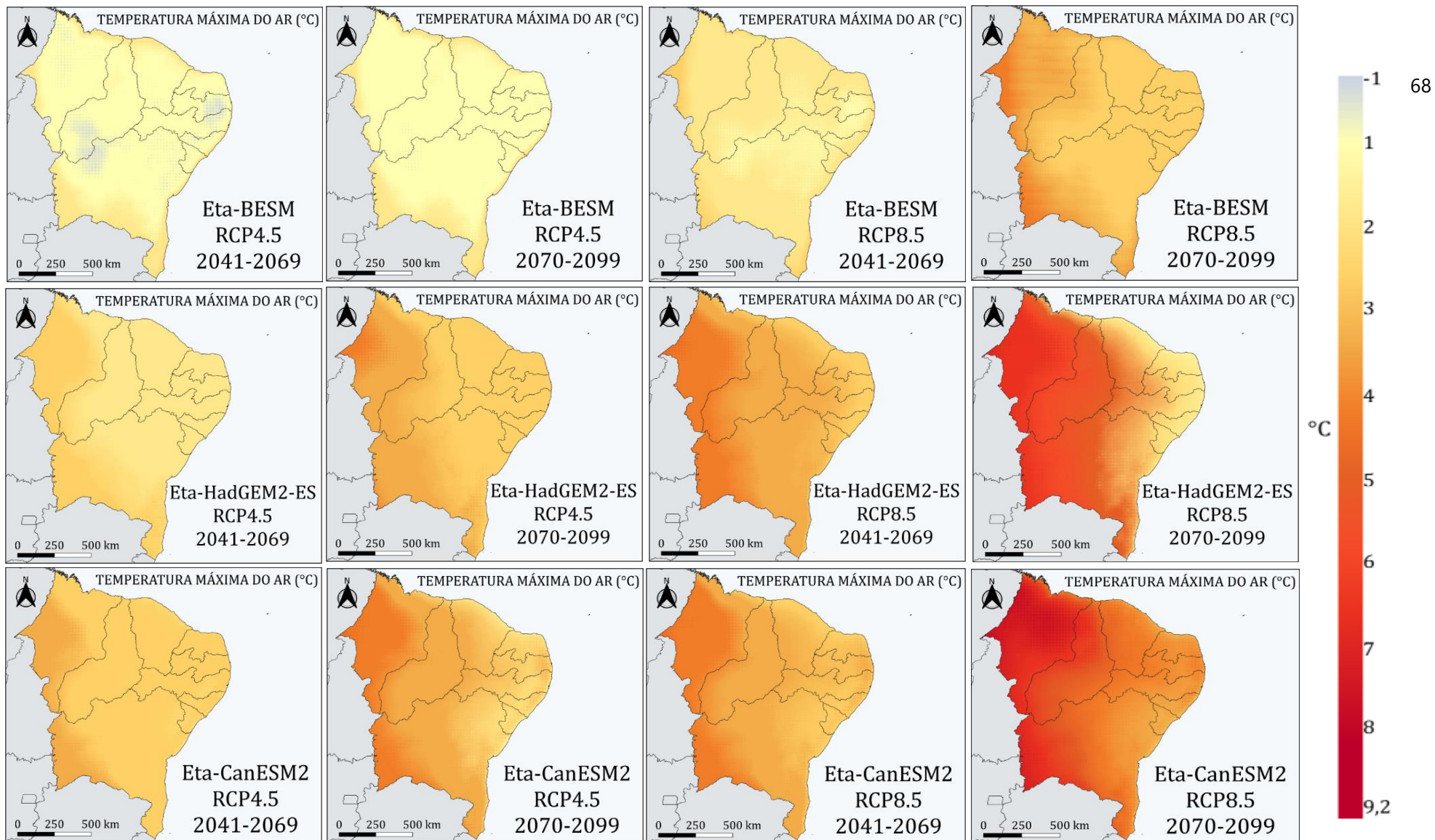


Figura 3.4: Anomalias para temperatura máxima anual nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 nos períodos de 2041-2069 e 2070-2099 a partir dos modelos Eta-BESM, Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 na região Nordeste do Brasil.

Resultados coerentes com os estudos de Bender e Sentelhas (2018) e Silva *et al.* (2019a) foram observados no presente trabalho. As projeções expressaram o aumento das temperaturas para os estados do Maranhão, Piauí e Bahia, onde o bioma do cerrado alcança áreas nestas regiões no Nordeste do Brasil. Para os três estados (Maranhão, Piauí e Bahia) a média do aumento das temperaturas ficou acima de 2°C, com exceção da temperatura máxima do ar no modelo Eta-BESM. De acordo com Santos *et al.* (2019) a média de aumento das temperaturas mínimas e máximas do ar, nos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5 para a bacia Rio Paraguaçu na Bahia é de 1,5°C e 0,85°C, no RCP4.5, e de 1,0°C e 0,8°C no RCP8.5, respectivamente.

Althoff *et al.* (2016) projetaram uma média de aumento de 4°C (2011-2040) na temperatura mínima do ar podendo chegar a 6°C até o final do século XXI. No caso da temperatura máxima do ar, os autores projetaram aumento de 6°C, podendo alcançar pontualmente 7,5°C ao final do século XXI a partir do modelo Eta no cenário A1B (cenário de emissões médias), no município de Santa Teresinha, no estado da Paraíba. No presente estudo, observou-se que para o estado da Paraíba o maior aumento da temperatura máxima do ar ocorreu no modelo Eta-HadGEM2-ES para o RCP8.5 no final do século XXI, sendo superior a 5°C para algumas áreas do estado. Aumentos excessivos na temperatura do ar no estado da Paraíba também foram observados através de tendências em dados históricos medidos em estações meteorológicas (Medeiros *et al.*, 2021). Esses resultados observacionais ratificam as projeções dos modelos climáticos.

A partir do Eta-HadGEM Chou *et al.* (2014b) projetaram aquecimento em torno de 9°C para o período 2071-2100, somente no RCP8.5, em parte da América do Sul e Central. No presente trabalho, nos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 resultados acima de 8°C foram projetados para localidades nos estados do Maranhão e do Piauí, este somente no Eta-CanESM2, no cenário mais pessimista e apenas para a temperatura máxima do ar (Figura 3.4).

O trabalho realizado por Cavalcante Junior *et al.* (2016) levou em consideração apenas os meses de março a maio de 2100 e as projeções foram realizadas para os municípios de Apodi, Ipanguaçu e Mossoró no estado do Rio Grande do Norte. Os autores observaram aumento de 7,8°C, 5,2°C e 10,3°C para as temperaturas média, mínima e máxima do ar, respectivamente no cenário mais pessimista. Já no presente estudo, o aumento para as temperaturas do ar nos municípios de Apodi, Ipanguaçu e Mossoró foram

inferiores a 5,0°C para os cenários RCP4.5 e RCP8.5 para os três modelos climáticos aplicados.

Para os municípios de Itambé e Goiana em Pernambuco, Carvalho *et al.* (2015) projetaram aumento das temperaturas mínimas e máximas do ar até o final do século XXI através do modelo Eta. Os autores relataram aumento de 2-3°C nas temperaturas mínima e máxima do ar no cenário de baixas emissões e de 4-5°C (mínima) e 3-5°C (máxima) no cenário de altas emissões até o final do século XXI para os dois municípios. Consonante com os resultados do trabalho de Carvalho *et al.* (2015), no presente trabalho, as projeções de aumento das temperaturas foram geradas em todos os modelos para os municípios de Itambé e Goiana com elevação superior a 4°C no cenário RCP8.5 para o final do século XXI no modelo Eta-HadGEM2-ES.

Resultados extremos, no presente artigo, foram projetados pelo Eta-HadGEM2-ES e pelo Eta-CanESM2 para os estados do Maranhão, Piauí e Bahia sob o RCP8.5 para o final do século XXI. Os dados apontaram aumentos acima de 6°C, 5°C e 7°C nas temperaturas média, mínima e máxima do ar, respectivamente. A partir de um conjunto de modelos climáticos, De Jong *et al.* (2019) indicaram elevação acima de 6°C até 2100 para a cidade de Imperatriz no estado do Maranhão e Marengo, Torres e Alves (2017) aumento de 4,4°C para o Nordeste, chegando a 6,2°C para algumas áreas, ambos no cenário RCP8.5. Resultados semelhantes foram encontrados no presente artigo, no qual projetou-se resultados acima de 6°C e de 8°C nas temperaturas média e máxima do ar respectivamente, com os modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 para Imperatriz no estado do Maranhão no RCP8.5 em 2070-2099.

Como pode ser observado na Figura 3.1, grande parte da região Nordeste caracteriza-se pelo clima semiárido, correspondendo a 1262 municípios em oito estados (IBGE, 2017). A elevação da temperatura nesse tipo climático também foi projetada para outras regiões do mundo. Gao e Giorgi (2008) projetaram o aquecimento para a região do Mediterrâneo, atingindo entre 4 e 4,5°C no inverno na parte oriental em 2071-2100 pelo modelo ICTO RegCM no cenário A2 (cenário de altas emissões). Ahmad *et al.* (2020), a partir de 7 modelos de circulação geral acoplados à atmosfera e ao oceano (AOGM's), para Faisalaba no Paquistão, projetaram aumento da temperatura mínima e máxima do ar alcançando o valor máximo de 3,8°C e 3,4°C, respectivamente, sob o RCP8.5.

Por sua vez, Moursi, Gaetani e Vignati (2017), para a bacia do rio Silver em Utah (EUA), verificaram projeções de aumento de 2,5°C e 4,8°C na temperatura média do ar no

RCP4.5 e no RCP8.5, respectivamente, até o final do século XXI. No estado de Queretaro, região semiárida no centro do México, Herrera-Pantoja e Hiscock (2015) projetaram aumento da temperatura média anual do ar entre 0,18°C e 4,68°C no cenário B1, e entre 0,38°C e 4,88°C no A1B. No Aquífero Ventós-Castellar no sudeste da Espanha, Touhami *et al.* (2015) projetaram aumentos da temperatura mínima e máxima do ar de forma mais intensa no cenário A2 (cenário de altas emissões) do que no B2 (cenário de baixas emissões) para o final do século XXI.

3.3.2. Umidade relativa do ar

As mudanças para a umidade relativa do ar projetadas a partir do conjunto de modelos climáticos associados aos cenários RCP4.5 e RCP8.5 podem ser observadas na Figura 3.5.

As projeções de redução da umidade relativa do ar no Nordeste do Brasil são predominantes em todos os modelos, com exceção, do modelo Eta-BESM sobretudo no cenário mais otimista onde o aumento da umidade relativa do ar alcança todos os estados. A diminuição da umidade é maior à medida que se afasta da costa e é mais expressiva sob o RCP8.5 em 2070-2099 (Figura 3.5). Nas projeções de Silva *et al.* (2019a) para o cerrado brasileiro, os resultados também indicaram a redução da umidade para o período de 2021-2050 para os cenários RCP2.6, RCP4.5 e RCP8.5 e de forma mais intensa no cenário mais pessimista no final do século XXI.

As projeções de redução da umidade relativa do ar são mais expressivas sob o RCP8.5 sobretudo para o final do século XXI (Figura 3.5). Além disso, sugere-se que a diminuição é maior no modelo Eta-CanESM2, com valores médios de 9,6% (Tabela 3.2). Segundo Marengo e Bernasconi (2015), reduções entre 5% e 15% são previstas para a umidade relativa do ar para a região Nordeste até o ano de 2100.

Segundo Cavalcante Junior *et al.* (2016), para os meses de março a maio no ano de 2100, a redução da umidade será de 9,8% no cenário B2 e de 16,1% no cenário A2 para os municípios de Apodi, Ipanguaçu e Mossoró. Neste trabalho, a redução mais elevada para esses municípios foi encontrada para Apodi (3%), no cenário mais pessimista e período 2070-2099 com o modelo Eta-CanESM2.

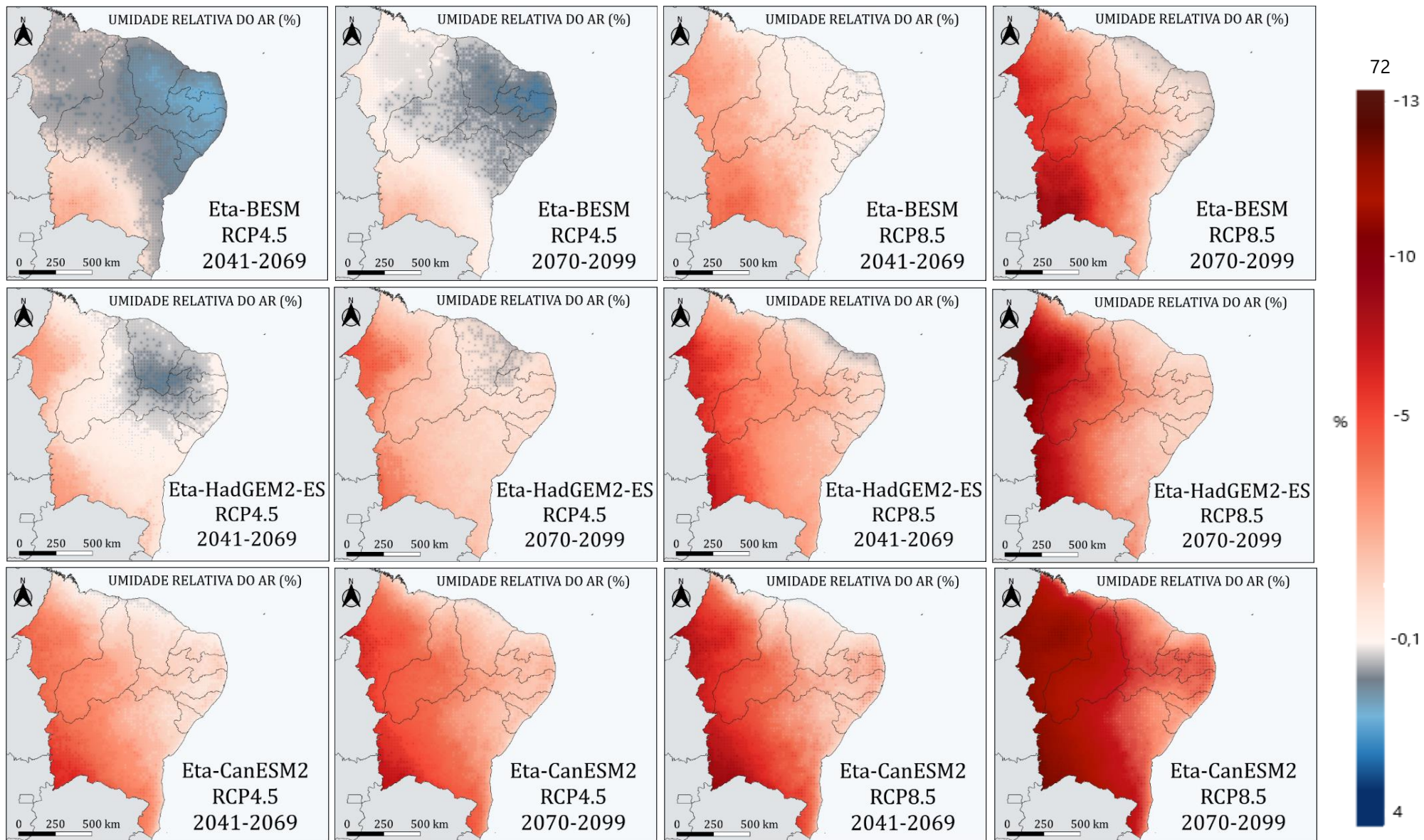


Figura 3.5: Anomalias para umidade relativa do ar anual nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 nos períodos de 2041-2069 e 2070-2099 a partir dos modelos Eta-BESM, Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 na região Nordeste do Brasil.

De acordo com o cálculo do desvio padrão, percebe-se que os resultados calculados indicaram que os valores estão próximos a média, o que demonstra a menor variabilidade dos dados (Tabela 3.2).

Tabela 3.2: Média e desvio padrão (DP) dos modelos Eta-BESM, Eta-HadGEM2-ES, Eta-CanESM2 e Eta-MIROC5 considerando os cenários RCP4.5 e RCP8.5 nos períodos de 2041-2069 e 2070-2099.

	Eta-BESM		Eta-HadGEM2-ES		Eta-CanESM2	
	Média (%)	DP (%)	Média (%)	DP (%)	Média (%)	DP (%)
RCP4.5 (41-69)	0,0	1,2	-1,1	1,4	-3,2	1,8
RCP4.5 (70-99)	-0,1	1,1	-2,5	1,5	-4,3	2,2
RCP8.5 (41-69)	-2,4	1,5	-4,1	2,2	-4,9	2,6
RCP8.5 (70-99)	-4,5	2,9	-5,4	3,2	-9,6	4,5
Valores médios	-1,7	1,7	-3,3	2,1	-5,5	2,8

3.3.3. Consequências potenciais

De acordo com Spinoni *et al.* (2014) em todo o Nordeste brasileiro houve aumento das áreas áridas entre 1951 e 2010 fazendo com que essa região fique sob risco de desertificação. Entre 1961 e 2014 Costa *et al.* (2020) observaram o aumento no número de dias e noites quentes e a redução do número de dias e noites frios. As projeções para o período de 2041-2069 e 2070-2099 realizadas neste artigo evidenciaram o aumento da temperatura e a redução predominante da umidade relativa do ar, o que poderá tornar o clima da região Nordeste ainda mais seco. Um cenário do aumento da frequência de dias secos futuros foram observados por Marengo, Torres e Alves (2017), os quais denotaram o aumento gradual no índice de dias consecutivos secos até o final do século XXI.

A partir de um multimodelo com o cenário RCP8.5, Prudhomme *et al.* (2013) apresentaram um aumento na frequência da seca para o Nordeste do Brasil em 2070-2099. As projeções do presente estudo mostraram que o cenário RCP8.5 é aquele em que o aumento da temperatura e a redução da umidade relativa do ar acontece de forma mais intensa, principalmente para o final do século XXI.

As mudanças climáticas projetadas poderão afetar diversas atividades humanas, incluindo a produção agrícola. Lucena *et al.* (2009) indicaram que a produção de soja será impactada de forma negativa no Nordeste e centro-oeste do Brasil devido ao aumento da temperatura do ar. Por sua vez, Silva *et al.* (2019b) observaram que no período de 1990-

2015 as temperaturas mais altas influenciaram de forma negativa a produção de cana-de-açúcar no estado da Paraíba.

Resultados semelhantes foram previstos por Cavalcante Junior *et al.* (2016) para os municípios de Apodi, Ipanguaçu e Mossoró no estado Rio Grande do Norte, onde o aumento na temperatura projetado será superior ao limite tolerado pela cultura de feijão-caupi em 2100, impactando negativamente no desenvolvimento e no rendimento da cultura. Esses dados são consistentes aos observados neste artigo para os três municípios, onde são previstos aumentos das temperaturas em todos os cenários, sendo acima de 4°C sob o RCP8.5 ao final do século XXI no modelo Eta-HadGEM2-ES. Enquanto isso, a umidade relativa do ar sofrerá uma redução no cenário mais pessimista para Apodi, Ipanguaçu e Mossoró de acordo com todos os modelos.

No estudo de Silva *et al.* (2010), também referente ao cultivo do feijão-caupi, os autores descreveram que a disponibilidade de áreas adequadas para a plantação desse cultivo sofrerá uma redução por conta do aumento da temperatura do ar no Nordeste do Brasil.

Os modelos utilizados no presente artigo projetaram o aumento futuro das temperaturas e redução da umidade relativa do ar no Nordeste do Brasil. Tendo em vista os resultados observados por Lucena *et al.* (2009), Cavalcante Junior *et al.* (2016) e Silva *et al.* (2019b), essas mudanças poderão causar sérias reduções na produção de soja, na cultura do feijão-caupi e na cana-de-açúcar. Outros cultivos sensíveis, principalmente a aumentos na temperatura, também serão afetados, assim como outras atividades humanas desenvolvidas nessa região como a geração elétrica, abastecimento de água, turismo e pecuária.

3.4. Conclusão

O presente trabalho utilizou o conjunto de três modelos climáticos globais associados a um modelo climático regional Eta para realizar o prognóstico relacionado a elementos do clima nos períodos futuros (2041-2069 e 2070-2099) e tomando como referência o período histórico (1961-1990) para os cenários RCP4.5 e RCP8.5. Foram analisados os parâmetros de temperatura média, mínima e máxima do ar e umidade relativa do ar para toda a região Nordeste do Brasil.

Temperaturas mais altas do que as do período de referência foram projetadas para os dois períodos futuros em ambos os cenários RCP, com exceção em alguns pontos para a temperatura máxima do ar sob o RCP4.5 pelo modelo Eta-BESM. Ao se comparar o período histórico com o futuro nos dois cenários RCP para toda a região, os maiores aumentos da temperatura foram projetados para o período de 2070-2099 sob o RCP8.5. Os resultados também indicaram projeções de aumentos excessivos na temperatura para áreas no Maranhão, Piauí e Bahia para os modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 para o cenário RCP8.5 em 2070-2099.

Os resultados para a umidade relativa do ar demonstraram projeções de redução predominante para os três modelos, com exceção do modelo Eta-BESM (somente no cenário mais otimista). As diminuições são maiores sob o RCP8.5 em 2070-2099, o que pode intensificar ainda mais a situação de algumas áreas que já são bastante secas.

No geral, os resultados projetados pelos modelos climáticos utilizados indicaram que nas próximas décadas serão intensificados os aumentos nas temperaturas e reduções na umidade relativa do ar já detectados em estudos com dados históricos para a maior parte do Nordeste do Brasil.

Seria prudente que medidas de adaptação a essas possíveis alterações climáticas começassem a ser traçadas pelos gestores públicos, de forma a diminuir os impactos negativos à população e a todas as atividades desenvolvidas nessa vasta região.

3.5. Referências

AHMAD, I.; AHMAD, B.; BOOTE, K.; HOOGENBOOM, G. Adaptation strategies for maize production under climate change for semi-arid environments. **European Journal of Agronomy**, v. 115, n. June 2019, p. 126040, 2020.

ALTHOFF, T. D.; MENEZES, R. S. C.; CARVALHO, A. L DE.; PINTO, A DE. S.; SANTIAGO, G. A. C. F.; OMETTO, J. P. H. B.; RANDOW, C. V.; SAMPAIO, E. V DE. S. B. Climate change impacts on the sustainability of the firewood harvest and vegetation and soil carbon stocks in a tropical dry forest in Santa Teresinha Municipality, Northeast Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 360, p. 367–375, 2016.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L DE. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

BENDER, F. D.; SENTELHAS, P. C. Solar radiation models and gridded databases to fill gaps in weather series and to project climate change in Brazil. **Advances in Meteorology**,

v. 2018, p. 1-15, 2018.

BESM. Brazilian Earth System Model. Disponível em: <http://www.inpe.br/BESM/>. Acesso em: 02/03/2021.

BRAZIL. Third National Communication of Brazil to the United Nations Framework Convention on Climate Change – Executive Summary. Ministry of Science, Technology and Innovation Secretariat of Policies and Programs of Research and Development General Coordination of Global Climate Change. Brasília, 2016.

CAPISTRANO, V. B.; NOBRE, P.; TEDESHI, R. G.; SILVA, J. Overview of climate change in the BESM-OA2.5 climate model. **Geoscientific Model Development Discussions**, p. 1–29, 2018.

CARVALHO, A. L DE.; MENEZES, R. S. C.; NÓBREGA, R. S.; PINTO, A DE. S.; OMETTO, J. P H. B.; RANDOW, C. V.; GIAROLLA. A. Impact of climate changes on potential sugarcane yield in Pernambuco, northeastern region of Brazil. **Renewable Energy**, v. 78, p. 26–34, 2015.

CAVALCANTE JUNIOR, E. G.; MEDEIROS, J. F DE.; SOBRINHO, J. E.; FIGUEIRÊDO, V. B.; COSTA, J. P. N DA.; SANTOS, W DE. O. Development and water requirements of cowpea under climate change conditions in the Brazilian semi-arid region. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, n. 9, p. 783–788, 2016.

CHOU, S. C.; MARENGO, J. A.; LYRA, A. A.; SUEIRO, G.; PESQUERO, J. F.; ALVES, L. M.; KAY, G.; BETTS, R.; CHAGAS, D. J.; GOMES, J. L.; BUSTAMANTE, J. F.; TAVARES, P. Downscaling of South America present climate driven by 4-member HadCM3 runs. **Climate Dynamics**, v. 38, n. 3–4, p. 635–653, 2012.

CHOU, S.C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DERECHYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.; BUSTAMANTE, J.; TAVARES, P.; SILVA, A.; RODRIGUES, D.; CAMOS, D.; CHAGAS, D.; SUEIRO, G.; SIQUEIRA, G.; NOBRE, P.; MARENGO, J. Evaluation of the Eta Simulations Nested in Three Global Climate Models. **American Journal of Climate Change**, 3, 438-454, 2014a. Disponível em: http://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx?PaperID=52887#.VakHg_IViko. Acesso em: 27/08/2020.

CHOU, S.C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DERECHYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.; BUSTAMANTE, J.; TAVARES, P.; SILVA, A.; RODRIGUES, D.; CAMOS, D.; CHAGAS, D.; SUEIRO, G.; SIQUEIRA, G.; NOBRE, P.; MARENGO, J. Evaluation of the Eta Simulations Nested in Three Global Climate Models. **American Journal of Climate Change**, 3, 438-454, 2014a. Disponível em: http://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx?PaperID=52887#.VakHg_IViko. Acesso em: 27/08/2020.

COSTA, R. L.; BAPTISTA, G. M DE. M.; GOMES, H. B.; SILVA, F. D DOS. S.; ROCHA JÚNIOR, R.; L DA.; SALVADOR, M DE. A.; HERDIES, D. L. Analysis of climate extremes indices over northeast Brazil from 1961 to 2014. **Weather and Climate Extremes**, v. 28, 2020.

DE JONG, P.; BARRETO, T. B.; TANAJURA, C. A. S.; KOULOUKOU, D.; ESQUERRE-OLIVEIRA, K. P.; KIPERSTOK, A.; TORRES, E. A. 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.

EK, M.; MITCHELL, K.E.; LIN, Y.; ROGERS, E.; GRUNMANN, P.; KOREN, V.; GAYNO, G.; TARPLEY, J.D. 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.

GAO, X.; GIORGI, F. Increased aridity in the Mediterranean region under greenhouse gas forcing estimated from high resolution simulations with a regional climate model. **Global and Planetary Change**, v. 62, n. 3–4, p. 195–209, 2008.

HDIDOUAN, D.; STAFFELL, I. The impact of climate change on the levelised cost of wind energy. **Renewable Energy**, v. 101, n. June, p. 575–592, 2017.

HERRERA-PANTOJA, M.; HISCOCK, K. M. Projected impacts of climate change on water availability indicators in a semi-arid region of central Mexico. **Environmental Science and Policy**, v. 54, p. 81–89, 2015.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cidades e Estados, 2017. Disponível em: <http://www.cca.ufpb.br/cca/contents/noticias/ibge-divulga-lista-de-municipios-localizados-na-regiao-semiarida-do-brasil>. Acesso em: 11/06/2020.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cidades e Estados, 2019. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados.html?>. Acesso em: 16/09/2020.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cidades e Estados, 2020. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados.html?view=municipio>. Acesso em: 16/09/2020.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Cambridge University Press; 2014.

JACOB, D.; PETERSEN, J.; EGGERT, B.; ALIAS, A.; CHRISTENSEN, O. B.; BOUWER, L. M.; BRAUN, A.; COLETTE, A.; DÉQUÉ, M.; GEORGIEVSKI, G.; GEORGIOPOLOU, E.; GOBIET, A.; MENUT, L.; NIKULIN, G.; HAENSLER, A.; HEMPELMANN, N.; JONES, C.; KEULER, K.; KOVATS, S.; KRÖNER, N.; KOTLARSKI, S.; KRIEGSMANN, A.; MARTIN, E.; MEIJGAARD, E. V.; MOSELEY, C.; PFEIFER, S.; PREUSCHMANN, S.; RADERMACHER, C.; RADTKE, K.; RECHID, D.; ROUNSEVELL, M.; SAMUELSSON, SOMOT, S.; SOUSSANA, J.; TEICHMANN, C.; VALENTINI, R.; VAUTARD, R.; WEBER, B.; YIOU, P. EURO-CORDEX: New high-resolution climate change projections for European impact research. **Regional Environmental Change**, v. 14, n. 2, p. 563–578, 2014.

JIA, G.; SHEVLIAKOVA, E.; ARTAXO, P.; NOBLET-DUCOUDRÉ, N. De.; HOUGHTON, R.; HOUSE, J.; KITAJIMA, K.; LENNARD, C.; POPP A.; SIRIN, A.;

SUKUMAR, R.; VERCHOT, L. 2019: Land–climate interactions. In: *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems* [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)]. In press.

KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 15, n. 3, p. 259–263, 2006.

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.

LIMA, F. J. L DE.; MARTINS, F. R.; COSTA, R. S.; GONÇALVES, A. R.; SANTOS, A. P. P DOS.; PEREIRA, E. B. The seasonal variability and trends for the surface solar irradiation in northeastern region of Brazil. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, v. 35, n. August, p. 335–346, 2019.

LYRA, A.; TAVARES, P.; CHOU, S. C.; SUEIRO, G.; DEREZYNSKI, C.; SONDERMANN, M.; SILVA, A.; MARENGO, J.; GIAROLLA, A. Climate change projections over three metropolitan regions in Southeast Brazil using the non-hydrostatic Eta regional climate model at 5-km resolution *Theor Appl Climatol*. 2017. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00704-017-2067-z>. Acesso em: 29/07/2020.

LUCENA, A. F. P DE.; SZKLO, A.; SCHAEFFER, R.; SOUZA, R. R DE. The vulnerability of renewable energy to climate change in Brazil. *Energy Policy*, v. 37, n. 3, p. 879–889, 2009.

MARENGO, J. A.; JONES, R.; ALVES, L. M.; VALVERDE, M. C. Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system. *International Journal of Climatology*, v. 29, n. March 2008, p. 2241–2255, 2009.

MARENGO, J. A.; CHOU, S. C.; KAY, G.; ALVES, L. M.; PESQUERO, J. F.; SOARES, W. R.; SANTOS, D. C.; LYRA, A. A.; SUEIRO, G.; BETTS, R.; CHAGAS, D. J.; GOMES, L. L.; BUSTAMANTE, J. F.; TAVARES, P. Development of regional future climate change scenarios in South America using the Eta CPTEC/HadCM3 climate change projections: Climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Paraná River basins. *Climate Dynamics*, v. 38, n. 9–10, p. 1829–1848, 2012.

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.

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.

MARTIN, G. M.; BELLOUIN, N.; COLLINS, W. J.; CULVERWELL, I. D.; HALLORAN, P. R.; HARDIMAN, S.C.; HINTON, T. J.; JONES, C. D.; MCDONALD, R.E; MCLAREN, A. J.; O'CONNOR, F. M.; ROBERTS, M. J.; RODRIGUEZ, J. M.; WOODWARD, S.; BEST, M. J.; BROOKS, M. E.; BROWN, A.; R.; BUTCHART, N.; DEARDEN, C.; DERBYSHIRE, S. H.; Dharssi, I.; DOUTRIAUX-BOUCHER, M.; EDWARDS, J. M.; FALLOON, P. D.; GEDNEY, N.; GRAY, L. J.; HEWITT, H. T.; HOBSON, M.; HUDDLESTON, M. R.; HUGHES, J.; INESON, S.; INGRAM, W. J.; JAMES, P. M.; JOHNS, T. C.; JOHNSON, C. E.; JONES, A.; JONES, C. P.; JOSHI, M. M.; KEEN, A. B.; LIDDICOAT, S.; LOCK, A. P.; MAIDENS, A. V.; MANNERS, J. C.; MILTON, S. F.; RAE, J. G.L.; RIDLEY, J. K.; SELLAR, A.; SENIOR, C. A.; TOTTERDELL, I. J.; VERHOEF, A.; VIDALE, P. L., WILTSHIRE, A. The HadGEM2 family of Met Office Unified Model climate configurations. **Geoscientific Model Development**, v. 4, n. 3, p. 723–757, 2011.

MATTHEW, O. J.; OHUNAKIN, O. S. Simulating the effects of climate change and afforestation on wind power potential in Nigeria. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 22, p. 41–54, 2017.

MEDEIROS, S. E. L.; NILO, P. F.; SILVA, L. P.; SANTOS, C. A. C.; CARVALHO, M.; ABRAHÃO, R. Influence of climatic variability on the electricity generation potential by renewable sources in the Brazilian semi-arid region. **Journal of Arid Environments**, v. 184, 2021.

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.

MOURSI, H.; GAETANI, M.; VIGNATI, E. A probabilistic assessment of agricultural water scarcity in a semi-arid and snowmelt-dominated river basin under climate change. **Agricultural Water Management**, v. 193, p. 142–152, 2017.

MÜLLER, J.; FOLINI, D.; WILD, M.; PFENNINGER, S. CMIP-5 models project photovoltaics are a no-regrets investment in Europe irrespective of climate change. **Energy**, v. 171, p. 135–148, 2019.

NOAA. National Oceanic and Atmospheric Administration. The First Climate Model. 2017. Disponível em: http://celebrating200years.noaa.gov/breakthroughs/climate_model/. Acesso em: 4/05/2020.

PRUDHOMME, C.; GIUNTOLI, I.; ROBINSON, E. L.; CLARK, D. B.; ARNELL, N. W.; DANKERS, R.; FEKETE, B. M.; FRANSSEN, W.; GERTEN, D.; GOSLING, S. N.; HAGEMANN, S.; HANNAH, D. M.; KIM, H.; MASAKI, Y.; SATOH, Y.; STACKE, T.; WADA, Y.; WISSER, D. 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, 2014.

QUEIROZ, A. R DE.; LIMA, L. M. M.; LIMA, J. W. M.; SILVA, B. C DE.; 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.

QUEIROZ, A. R. DE, FARIA, V.; LIMA, L. M. M.; LIMA, J. W. M. Hydropower revenues under the threat of climate change in Brazil Intergovernmental Panel on Climate Change. **Renewable Energy**, v. 133, p. 873–882, 2019.

RIAHI, K.; RAO, S.; KREY, V.; CHO, C.; CHIRKOV, V.; FISCHER, G.; KINDERMANN, G.; NAKICENOVIC, N.; RAFAJ, P. RCP 8.5-A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. **Climatic Change**, v. 109, n. 1, p. 33–57, 2011.

RONDEAU-GENESSE, G.; BRAUN, M. Impact of internal variability on climate change for the upcoming decades: analysis of the CanESM2-LE and CESM-LE large ensembles. **Climatic Change**, p. 1–16, 2019.

RUFFATO-FERREIRA, V.; BARRETO, R DA. C.; OSCAR JÚNIOR, A.; SILVA, L. W.; VIANA, D DE. B.; NASCIMENTO, J. A S DO.; FREITAS, M. A. V DE. 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, n. October 2015, p. 1124–1137, 2017.

SANTOS, C. A. S.; ROCHA, F. A.; RAMOS, T. B.; ALVES, L. M.; MATEUS, M.; OLIVEIRA, R. P DE.; NEVES, R. Using a hydrologic model to assess the performance of regional climate models in a semi-arid Watershed in Brazil. **Water (Switzerland)**, v. 11, n. 1, p. 1–17, 2019.

SHEN, M.; CHEN, J.; ZHUAN, M; CHEN, H.; XU, C.; XIONG, L. Estimating uncertainty and its temporal variation related to global climate models in quantifying climate change impacts on hydrology. **Journal of Hydrology**, v. 556, p. 10–24, 2018.

SILVA, V. DE P. R.; CAMPOS, J. H. B. C.; SILVA, M. T.; AZEVEDO, P. V. Impact of global warming on cowpea bean cultivation in northeastern Brazil. **Agricultural Water Management**, v. 97, n. 11, p. 1760–1768, 2010.

SILVA, P. S.; BASTOS, A.; LIBONATI, R.; RODRIGUES, J. A.; DACAMARA, C. C. Impacts of the 1.5 °C global warming target on future burned area in the Brazilian Cerrado. **Forest Ecology and Management**, v. 446, n. May, p. 193–203, 2019a.

SILVA, W. K. DE M.; FREITAS, G. P DE.; COELHO JUNIOR, L. M.; PINTO, P. A. L DE. A.; ABRAHÃO, R. Effects of climate change on sugarcane production in the state of Paraíba (Brazil): a panel data approach (1990–2015). **Climatic Change**, v. 154, n. 1–2, p. 195–209, 2019b.

SPINONI, J.; VOGT, J.; NAUMANN, G.; CARRAO, H.; BARBOSA, P. Towards identifying areas at climatological risk of desertification using the Köppen–Geiger classification and FAO aridity index. **International Journal of Climatology**, v. 35, p. 2210–2222, 2014.

THOMSON, A. M.; CALVIN, K. V.; SMITH, S. J.; KYLE, G. P.; VOLKE, A.; PATEL, P.; DELGADO-ARIAS, S.; WISE, M. A.; CLARKE, L. E.; EDMONDS, J. A. RCP4.5: A

pathway for stabilization of radiative forcing by 2100. **Climatic Change**, v. 109, n. 1, p. 77–94, 2011.

TOUHAMI, I.; CHIRINO, E.; ANDREU, J. M.; SÁNCHEZ, J. R.; BELLOT, J. Assessment of climate change impacts on soil water balance and aquifer recharge in a semiarid region in south east Spain. **Journal of Hydrology**, v. 527, p. 619–629, 2015.

VEIGA, S. F.; NOBRE, P.; GIAROLLA, E.; CAPISTRANO, V.; BAPTISTA, M.; MARQUEZ, A. L.; NILO, F. S.; BONATTI, J. P.; KUBOTA, P.; NOBRE, C. A. 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.

WOO, S.; SINGH, G. P.; OH, J.; LEE, K. Projected changes in summer precipitation over East Asia with a high-resolution atmospheric general circulation model during 21st century. **International Journal of Climatology**, v. 38, n. 12, p. 4610–4631, 2018.

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.

CAPÍTULO 4

PROJEÇÕES DE PRECIPITAÇÃO PARA A REGIÃO NORDESTE DO BRASIL EMPREGANDO UM CONJUNTO COM QUATRO MODELOS CLIMÁTICOS GLOBAIS ASSOCIADOS AO MODELO REGIONAL ETA.

Resumo

A variabilidade na precipitação, o aumento da frequência das secas em várias regiões pelo mundo e os eventos extremos ocorrendo de forma mais intensa e frequentes aumentam a preocupação de se entender como os parâmetros climáticos se comportarão diante de um novo cenário no clima. Desta forma, no presente trabalho foram aplicados quatro modelos climáticos globais (BESM, HadGEM2-ES, CanESM2 e MIROC5) associados ao modelo climático regional Eta levando em consideração os cenários RCP4.5 e RCP8.5 a fim de projetar dados de precipitação para a região Nordeste do Brasil para os períodos futuros de 2041-2069 e 2070-2099 comparados ao período de referência de 1961-1990. Os resultados mostraram que, apesar de alguns modelos apresentarem uma variabilidade na precipitação, no geral, as projeções apontaram que a região Nordeste do Brasil poderá sofrer com a redução das chuvas e com isso tornar mais crítico o cenário de seca em algumas regiões e impactar de forma negativa a produção agrícola, o abastecimento hídrico e a produção energética.

Palavras-chave: Mudanças climáticas, IPCC, RCP4.5, RCP8.5, ciclo hidrológico

Abstract

The variability in precipitation, the increase in the frequency of droughts in various regions around the world and the extreme events occurring in a more intense and frequent way increase the concern to understand how the climatic parameters will behave in the face of a new scenario in the climate. Thus, in the present work, four global climate models were applied (BESM, HadGEM2-ES, CanESM2 and MIROC5) associated with the Eta regional climate model taking into account the scenarios RCP4.5 and RCP8.5 in order to project precipitation data for the Northeast region of Brazil for the future periods of 2041-2069 and 2070-2099 compared to the reference period of 1961-1990. The results showed that, although some models show a variability in precipitation, in general, the projections pointed out that the Northeast region of Brazil may suffer from the reduction of rainfall and thus make the drought scenario more critical in some regions and impact on negatively affect agricultural production, water supply and energy production.

Keyword: Climate change, IPCC, RCP4.5, RCP8.5, hydrological cycle

4.1. Introdução

O Nordeste do Brasil é a segunda maior região do país, o que corresponde a aproximadamente 18% do território nacional (LIMA *et al.*, 2019). A região caracteriza-se por apresentar predominantemente o clima tropical, todavia, o clima semiárido também alcança todos os estados, com exceção do Maranhão (ALVARES *et al.*, 2013).

O relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) de 2019 relatou o aumento da frequência de secas em muitas regiões pelo mundo incluindo a Amazônia e o Nordeste do Brasil (JIA *et al.*, 2019).

As mudanças no clima, a variabilidade da precipitação e o aumento dos eventos climáticos extremos evidenciam a necessidade de compreender as condições climáticas futuras. Sendo assim, foram desenvolvidos os modelos climáticos, os quais consideram uma série de parâmetros e com isso são capazes de projetar dados climáticos futuros (QUEIROZ *et al.*, 2016). O primeiro modelo de circulação geral foi desenvolvido no final da década de 60 em Princeton, Estados Unidos, no Laboratório de Dinâmica de Fluidos Geofísicos da NOAA (NOAA, 2017). Com o passar do tempo a evolução computacional permitiu que os modelos fossem melhorados com aumento na resolução e acréscimo de componentes e de processos (MARENGO *et al.*, 2009).

Associados aos modelos climáticos são utilizados os cenários RCP (Caminhos Representativos de Concentração), os mesmos aplicados nos relatórios IPCC. Os cenários levam em consideração as emissões e a concentração de gases de efeito estufa, se medidas para mitigação serão aplicadas, o forçamento radioativo, entre outros aspectos (THOMSON *et al.*, 2011; RIAHI *et al.*, 2011).

Projeções realizadas indicaram o aumento das chuvas na costa norte do Peru e Equador e a sudeste da América do Sul, no entanto, o leste da Amazônia e a região Nordeste sofrerão com a redução nos índices pluviométricos (MARENGO *et al.*, 2012). Além disso, Marengo *et al.* (2009) projetaram o aumento de dias secos e consecutivos para o leste da Amazônia e Nordeste do Brasil e tendência negativa para a precipitação. Dessa forma, o aumento da temperatura e a redução das chuvas podem gerar condições mais quentes e secas e, com isto, aumentar o cenário de aridez na região Nordeste (MARENGO; BERNASCONI, 2015).

O presente trabalho teve por objetivo projetar as condições de precipitação para a região Nordeste do Brasil empregando um conjunto com quatro modelos climáticos globais associados ao modelo climático regional Eta. Junto aos modelos utilizou-se os cenários RCP4.5 e RCP8.5 para os períodos futuros de 2041-2069 e 2070-2099 comparando-os com o período de 1961-1990.

4.2. Metodologia

4.2.1. Caracterização da área

A região Nordeste do Brasil está localizada no extremo leste da América do Sul e é banhada pelo Oceano Atlântico, sendo a segunda maior região do Brasil (COSTA *et al.*, 2020). A região possui área de 1.552.167,01 km² e população estimada em 57.374.243 pessoas em 2020 (IBGE, 2019; IBGE, 2020) (Figura 4.1).

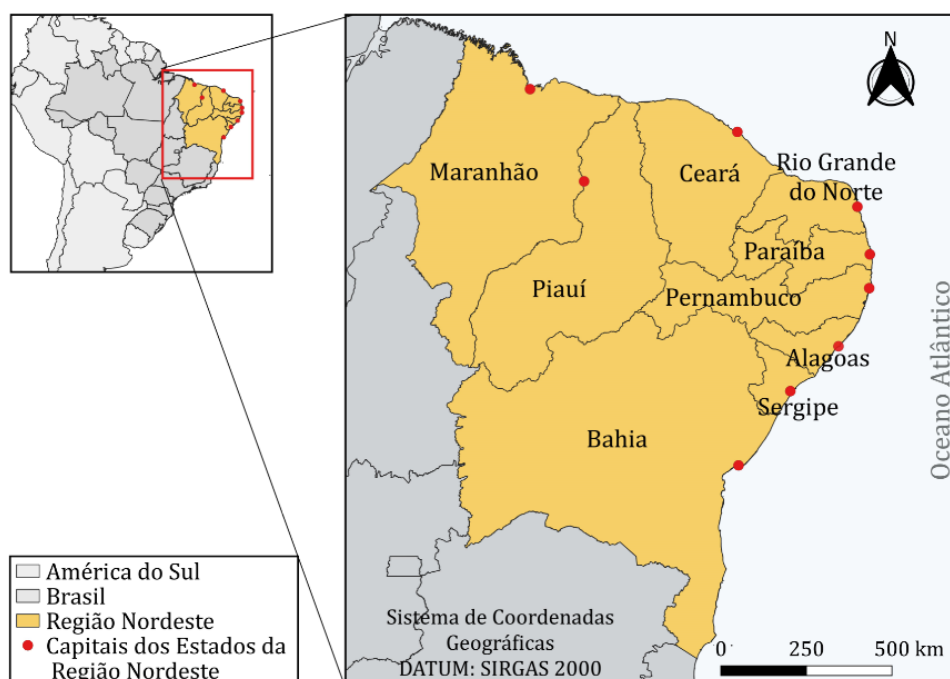


Figura 4.1: Mapa de localização da Região Nordeste do Brasil. Fonte: (IBGE, 2017).

Em razão de sua grande extensão o Nordeste do Brasil possui clima tropical, o qual alcança todos os estados. Segundo a classificação de Köppen-Geiger, o clima semiárido pode ser encontrado em todos os estados do Nordeste, com exceção do Maranhão (ALVARES *et al.*, 2013). Além disso, caracteriza-se por ser uma região com acentuada

variabilidade na precipitação anual e temperaturas elevadas com resultados médios que variam entre 20°C e 28°C (LIMA *et al.*, 2019; COSTA *et al.*, 2020).

4.2.2. Dados das projeções climáticas

Os dados dos elementos foram derivados de projeções provenientes de um conjunto de quatro modelos climáticos globais associados a um modelo climático regional obtidos através 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.*, 2017).

Os quatro modelos globais utilizados foram o Modelo Brasileiro do Sistema Terrestre – BESM (BESM, 2020), o britânico *Hadley Centre Global Environment Model* versão 2 - *Earth System* - HadGEM2-ES, o canadense *Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis*– CanESM2 e o japonês *Model for Interdisciplinary Research On Climate* - MIROC5 (MOHAN; BHASKARAN, 2019) (ANEXO I).

O modelo climático BESM foi desenvolvido pelo INPE e é baseado na estrutura do modelo acoplado oceano-atmosfera do CPTEC (VEIGA *et al.*, 2019). Este modelo leva em consideração a influência dos biomas brasileiros sobre o clima global, a dinâmica da vegetação e o processo de formação das nuvens, além de fenômenos como as queimadas, por exemplo (BESM, 2021). O BESM é acoplado ao modelo oceânico MOM4 (*Modular Ocean Model* 4) , enquanto seus processos da superfície terrestre são representados a partir do modelo SSIB (Modelo Simples da Biosfera) (CHOU *et al.*, 2014a).

O HadGEM2-ES traz melhorias do modelo HadGEM1. A família HadGEM inclui componentes atmosféricos, oceânicos e gelo marinho. Além disso, o componente do sistema terrestre engloba o ciclo do carbono terrestre e oceânico e a química atmosférica. Entre outros aspectos, o modelo HadGEM2-ES simula a cobertura vegetal, a respiração do solo e o armazenamento de carbono (MARTIN *et al.*, 2011).

O CanESM2 é integrado pelo modelo físico-oceânico-atmosfera (CanCM4), acoplado a um modelo de carbono terrestre (CTEM) e um modelo de carbono oceânico (CMOC) (SOSPEDRA-ALFONSO; MERRYFIELD, 2017).

O modelo MIROC5 foi desenvolvido pela Universidade de Tóquio em conjunto com o Centro de Pesquisa do Sistema Climático (CCSR) da Universidade de Tóquio, o Instituto Nacional de Estudos Ambientais (NIES) e a Agência Japonesa para Ciência e

Tecnologia Marinho-Terrestre. Possui um modelo oceânico e também um componente de gelo marinho, além dos componentes atmosféricos e terrestres (WATANABE *et al.*, 2010).

Por fim, o modelo regional Eta foi desenvolvido pela Universidade de Belgrado junto ao Instituto de Hidrometeorologia da Iugoslávia e operacionalizado no *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) (RUFFATO-FERREIRA *et al.*, 2017). Os processos da superfície terrestre são retratados pelo modelo de superfície da terra Noah (EK *et al.*, 2003), e a radiação de ondas curtas e ondas longas é representada por Lacis e Hansen (1974) e Fels e Schwarzkopf (1975), respectivamente. Por sua vez, a microfísica das nuvens é baseada no esquema de Zhao *et al.* (1997).

Foram considerados dois cenários climáticos futuros do IPCC, o RCP4.5 e o RCP8.5. Neste estudo empregou-se o RCP4.5 como um cenário mais otimista, esse cenário considera a estabilização da forçante radioativa em $4,5 \text{ W/m}^2$ resultante de ações políticas para limitar a emissão dos gases de efeito estufa, entre outras escolhas futuras (THOMSON *et al.*, 2011). O RCP8.5, considerado o cenário mais pessimista, caracteriza-se por altas emissões, concentração crescente dos gases de efeito estufa e poucas iniciativas para mitigar os impactos climáticos. Sendo assim, a forçante radioativa chegaria a $8,5 \text{ W/m}^2$ até o final do século XXI (RIAHI *et al.*, 2011).

Para realizar as projeções climáticas foi considerado o período de referência (1961-1990), por ser uma normal climatológica de referência, e os períodos futuros (2041-2069 e 2070-2099) em 3237 pontos, os quais estão a uma distância de aproximadamente 22,3 km um do outro, ao longo de toda a região Nordeste do Brasil.

4.3. Resultados e Discussão

4.3.1. Precipitação

Na Figura 4.2 é possível observar o comportamento da precipitação para toda a região Nordeste a partir das projeções realizadas nos modelos BESM, HadGEM2-ES, CanESM2 e MIROC5 associados ao modelo regional Eta.

As projeções derivadas dos modelos Eta-HadGEM2-ES, Eta-MIROC5 e Eta-CanESM2 evidenciaram a possível redução da precipitação na maior parte do Nordeste do Brasil. No caso dos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5, é possível observar que pode haver um aumento da precipitação em algumas localidades sendo mais expressivo

sob o RCP4.5 sobretudo em 2041-2069 no modelo Eta-HadGEM2-ES e em 2070-2099 no modelo Eta-MIROC5 (Figura 4.2).

Percebe-se que apesar dos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5 projetarem aumento da precipitação para algumas áreas do Nordeste há algumas diferenças a serem observadas. No caso do modelo Eta-HadGEM2-ES sob o RCP4.5 essa redução ocorre na maior parte da região Nordeste predominantemente em 2041-2069. Por sua vez, no modelo Eta-MIROC5 em 2041-2069, sob o RCP4.5, a diminuição da precipitação atinge parte da costa que se estende do estado do Maranhão ao Rio Grande do Norte adentrando ao continente. No período de 2070-2099 essa redução alcança também a costa da Paraíba, de Pernambuco, de Alagoas e de Sergipe além de parte do território desses estados e uma pequena porção da Bahia. Sob o RCP8.5 também se percebe que poderá haver aumento da precipitação nos estados localizados ao Norte da região Nordeste (Figura 4.2).

Apesar das projeções pontuais de aumento em alguns cenários, no geral, a região Nordeste do Brasil poderá sofrer com a reduções na precipitação, ocorrendo no modelo Eta-CanESM2 as maiores diminuições. Nesse modelo, os resultados projetados sugeriram diminuição da precipitação para todo o Nordeste nos dois cenários aplicados. Essas reduções são bastante acentuadas sob o RCP8.5 sobretudo para o final do século XXI (Figura 4.2). A partir de um conjunto de modelos climáticos, Marengo, Torres e Alves (2017) indicaram que a maioria dos modelos aplicados projetaram aumento da precipitação no verão, mas diminuição no outono, inverno e primavera.

Os dados gerados a partir do modelo Eta-BESM chamam atenção pelos resultados extremos de aumento da precipitação para todo o Nordeste, o que vem de encontro com os resultados apresentados pelos modelos Eta-HadGEM2-ES, Eta-CanESM2 e Eta-MIROC5 (Figura 4.2). No Eta-BESM apenas alguns pontos, nos estados do Maranhão, Bahia e Piauí indicaram uma pequena redução da precipitação (Figura 4.2).

Verifica-se que apesar de nos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5 as projeções sugerirem aumento da precipitação para algumas áreas, os resultados ainda são muito divergentes dos apresentados pelo modelo Eta-BESM (Figura 4.2).

As projeções realizadas pelo Eta-BESM geraram resultados acentuados e muito distantes do esperado para a região Nordeste. De acordo com um estudo realizado por Chou *et al.* (2014a), os níveis para precipitação projetados pelo modelo Eta-BESM para o centro-sul do Brasil atingiram resultados extremos, situação que não ocorre quando os

autores utilizaram apenas o modelo BESM. Por sua vez, Nobre *et al.* (2013) afirmaram que a precipitação é superestimada ao sul da linha do Equador no modelo BESM.

Projeções para a precipitação foram realizadas por Bronstert *et al.* (2005), Marengo *et al.* (2009), Gondim *et al.* (2012), Marengo *et al.* (2012), Chou *et al.* (2014b), Marengo e Bernasconi (2015), Carvalho *et al.* (2015), Silva e Haas (2016), Marengo, Torres e Alves (2017) e Bender e Sentelhas (2018).

Para a Bacia do rio Jaguaribe, localizada em uma região semiárida do estado do Ceará, Gondim *et al.* (2012) identificaram uma redução de 10,7% e 18,2% das chuvas nos cenários A2 e B2 respectivamente, para o período 2025-2050. Neste trabalho as reduções mais acentuadas da precipitação para o estado do Ceará ocorreram no cenário mais pessimista para o final do século XXI para os modelos Eta-MIROC5, Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 de 16,7%, 32,1% e 82,2%, respectivamente. Por sua vez, para uma área do semiárido nordestino que compreende os estados do Ceará e do Piauí, a redução de 50% da precipitação foi projetada pelo modelo ECHAM-4. No entanto, um resultado bastante divergente foi observado ao se utilizar o modelo HADCM, no qual o resultado encontrado é de um aumento de 21% na precipitação, ambos para 2070-2099 (BRONSTERT *et al.*, 2005).

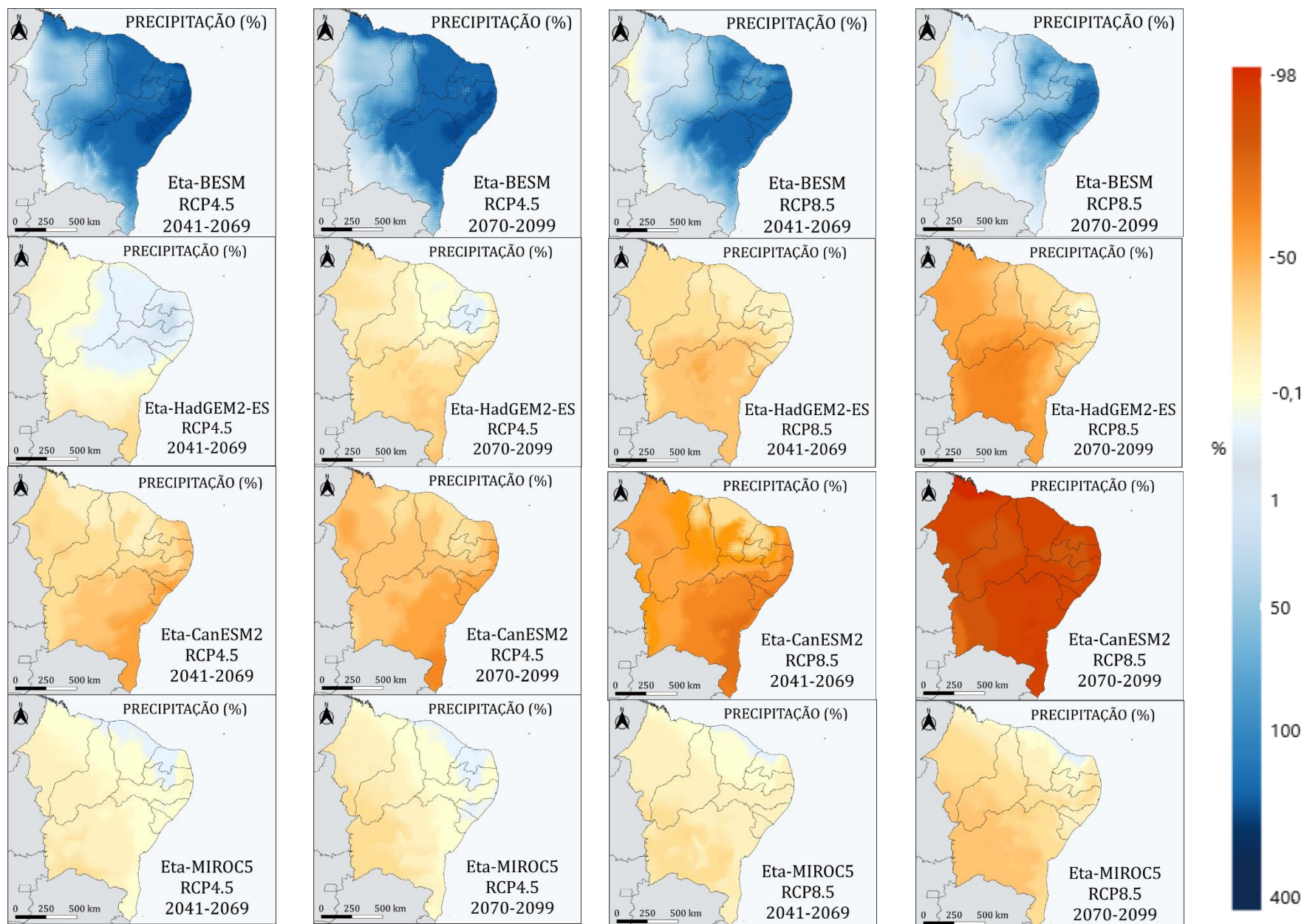


Figura 4.2: Alterações percentuais projetadas para precipitação anual nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 nos períodos de 2041-2069 e 2070-2099 para os modelos Eta-BESM, Eta-HadGEM2-ES, Eta-CanESM2 e Eta-MIROC5 na região Nordeste do Brasil.

No presente trabalho, as projeções no modelo Eta-BESM para o final do século XXI projetaram o aumento da precipitação. Em seu estudo Bronstert *et al.* (2005) evidenciaram o aumento da precipitação em 21% no modelo HadCM-2, todavia, os autores projetaram a redução das chuvas em 50% a partir do modelo ECHAM-4 no Nordeste em 2070-2099.

No caso de Bender e Sentelhas (2018) as projeções da precipitação em áreas dos estados do Maranhão, Piauí e Bahia sugeriram uma redução ocorrendo de forma mais intensa de agosto a outubro. Projeções observadas neste trabalho nos modelos Eta-HadGEM2-ES, Eta-CanES2 e Eta-MIROC5 são mais expressivas sob o RCP8.5 em 2070-2099. Para o Eta-HadGEM2-ES as médias de redução são de 35,3%, 36,4% e 48,8% e no Eta-MIROC5 são de 18,8%, 20,3% e 30,1% para os estados do Maranhão, Piauí e Bahia respectivamente. Por sua vez, no modelo Eta-CanESM2 as médias de redução das chuvas foram bastante extremas, com resultados acima dos 80% nos três estados.

A partir do modelo HadCM3, Marengo *et al.* (2012) indicaram uma diminuição de 40% das chuvas na Amazônia e no Nordeste intensificando-se após 2040. Por sua vez, também utilizando o HadCM3, neste caso associado ao Eta, Marengo e Bernasconi (2015) sugeriram que a redução da precipitação poderá ser de cerca de 22% no Nordeste. Já Marengo *et al.* (2009) observaram uma tendência negativa para as chuvas ao leste da Amazônia e no Nordeste do Brasil. Por fim, as análises realizadas Silva e Haas (2016) apontaram uma queda na precipitação para o Nordeste do Brasil projetaram a diminuição da precipitação.

No presente trabalho a média da redução da precipitação considerando todo o Nordeste do Brasil é maior no cenário mais pessimista em 2070-2099 para os modelos Eta-MIROC5 (23,3%), Eta-HadGEM2-ES (40,8%) e Eta-CanESM2 (83,3%). No caso do modelo Eta-BESM os resultados exagerados para o aumento da precipitação contrastam com os resultados obtidos por Marengo *et al.* (2009), Marengo *et al.* (2012), Marengo e Bernasconi (2015), Silva e Haas (2016) e também os observados neste trabalho com os outros modelos analisados

Os resultados projetados por Chou *et al.* (2014b) indicaram que no norte do Nordeste do Brasil as mudanças futuras na precipitação serão positivas, isso apenas não foi observado no cenário RCP8.5 no modelo Eta-HadGEM. No presente estudo, projetou-se o aumento da precipitação para a parte norte da região Nordeste do Brasil no modelo Eta-MIROC5 em ambos os cenários aplicados, no modelo Eta-HadGEM2 sob o RCP4.5

sobretudo em 2041-2069. No caso do modelo Eta-BESM esse aumento também foi observado em todos os cenários, mas de forma extrema.

Para os municípios de Itambé e Goiana em Pernambuco, por meio do modelo Eta, Carvalho *et al.* (2015) simularam redução da precipitação entre 40% e 44% (cenário de baixas emissões) e entre 38% e 48% (cenário de altas emissões) até o final do século XXI nos dois municípios. Neste trabalho as maiores reduções na precipitação foram projetadas pelo modelo Eta-CanESM2 no cenário mais pessimista em 2070-2099 com resultados muito acentuados, acima de 90%. No caso dos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5 as projeções foram acima de 20% nos dois municípios no cenário RCP4.5 para o modelo Eta-HadGEM2-ES e no RCP8.5 no Eta-MIROC5 para 2070-2099. Por fim, os resultados do modelo Eta-BESM indicaram aumento extremo de chuva em Itambé e Goiana.

A fim de observar a dispersão dos resultados dos modelos em cada cenário futuro, calculou-se o desvio padrão. Os resultados mostraram que os modelos Eta-BESM apresentou a maior dispersão de dados, principalmente no cenário RCP4.5, conseqüentemente, a maior variação dos dados em relação a média. Desta forma, compreende-se que nesses cenários os valores variam mais entre si do que nos modelos Eta-HadGEM2-ES, Eta-CanESM2 e Eta-MIROC5 (Tabela 4.1).

O modelo Eta-MIROC5 apresentou o menor desvio padrão, sendo assim, entende-se que os resultados estão mais próximos da média o que indica uma menor variabilidade (Tabela 4.1).

Tabela 4.1: Média e desvio padrão (DP) dos modelos Eta-BESM, Eta-HadGEM2-ES, Eta-CanESM2 e Eta-MIROC5 considerando os cenários RCP4.5 e RCP8.5 nos períodos de 2041-2069 e 2070-2099.

	Eta-BESM		Eta-HadGEM2-ES		Eta-CanESM2		Eta-MIROC5	
	Média (%)	DP (%)	Média (%)	DP (%)	Média (%)	DP (%)	Média (%)	DP (%)
RCP4.5 (41-69)	94,5	67,5	-0,4	15,6	-28,9	10,9	-10,0	7,7
RCP4.5 (70-99)	97,5	68,4	-16,3	11,4	-36,2	9,9	-11,0	10,9
RCP8.5 (41-69)	65,1	52,2	-27,9	9,5	-45,4	13,5	-16,3	9,3
RCP8.5 (70-99)	37,0	46,3	-40,8	15,0	-83,3	6,3	-23,3	12,2
Valores médios	73,5	58,6	-21,4	12,9	-48,4	10,2	-15,2	10,0

4.3.2. Possíveis consequências das mudanças projetadas pelos modelos

O Nordeste do Brasil há séculos enfrenta o problema da disponibilidade de água e as mudanças climáticas poderão agravar essa situação. As mudanças na precipitação projetadas neste trabalho evidenciaram predominantemente a redução das chuvas nos modelos Eta-HadGEM2-ES, Eta-CanESM2 e Eta-MIROC5, em praticamente, toda a região Nordeste.

Caso as projeções de redução se concretizem, a diminuição da precipitação poderá gerar impactos enormes no abastecimento hídrico, na produção energética e tornar o clima mais árido. Segundo Marengo e Bernasconi (2015) a diminuição das chuvas associada ao aumento na evaporação e temperatura do ar contribuirá para a aridez na região Nordeste. Além disso, Marengo, Torres e Alves (2017) afirmaram que, apesar da diminuição na tendência de precipitação, existe a disposição de episódios de chuvas mais intensas que acontecerão entre os períodos secos, no entanto, a falta de chuva por um tempo mais longo poderá causar secas sazonais.

Segundo Bronstert *et al.* (2005), a partir do modelo ECHAM, as mudanças na precipitação poderão causar a redução do escoamento para a foz do rio Jaguaribe de 2025 até 2050. Para o estado do Ceará, os autores evidenciaram que após 2025 poderá ocorrer uma diminuição no volume de água armazenado nos reservatórios.

Em seu estudo realizado para os municípios do estado da Paraíba para o período de 1990 a 2015, Silva *et al.* (2019) explicaram que a precipitação é um fator que age de forma significativamente positiva na produção de cana-de-açúcar. Observa-se que no presente trabalho os modelos Eta-HadGEM2-ES, Eta-CanESM2 e Eta-MIROC5 projetaram redução da precipitação para o estado da Paraíba, ou seja, isso poderá causar a possível redução da produção de cana-de-açúcar no estado. O mesmo poderá acontecer nos outros estados do Nordeste onde a cana-de-açúcar é produzida.

Em um polígono de seca que alcança os estados do Ceará e Piauí, Krol e Bronstert (2007) destacaram que o semiárido nordestino sofrerá impactos devido às mudanças climáticas, onde o armazenamento de água e a produção agrícola irrigada serão afetadas.

Resultado semelhante foi observado por Bronstert *et al.* (2005) que afirmaram que a redução nas chuvas poderá impactar na agricultura. Quando os autores utilizaram o modelo ECHAM-4 observou-se diminuição de 12-55% nos rendimentos agrícolas e tendência de redução de 24% na precipitação. No caso do modelo HadCM, enquanto as

projeções indicaram aumento de 4-23% nos rendimentos a tendência para precipitação aumentou em 10%.

Tendo em vista os resultados observados nos trabalhos citados anteriormente, a queda na precipitação projetada no presente estudo poderá gerar impactos futuros na agricultura para a maior parte do Nordeste do Brasil e de forma mais acentuada no cenário RCP8.5, sobretudo em 2070-2099, quando a redução das chuvas ocorrerá de forma mais intensa.

De acordo com Lucena *et al.* (2009), a geração de energia hidrelétrica sofrerá impactos devido à diminuição da vazão dos rios. Segundo os autores, das bacias estudadas no Brasil, a Bacia do Rio São Francisco, tão importante para o Nordeste brasileiro, será a mais afetada com uma queda superior a 7% na produção de eletricidade. Esse resultado é consistente com o observado por Ruffato-Ferreira *et al.* (2017), os quais preveem uma tendência futura crescente na escassez de água em quase todo o território brasileiro, sendo a Bacia do Rio São Francisco a mais vulnerável.

A disponibilidade de água na região Nordeste poderá diminuir consideravelmente, e com isso, afetar a produção da energia hidrelétrica de forma negativa. Lucena, Schaeffer e Szklo (2010) indicaram que este cenário é mais desfavorável para as bacias do Parnaíba, do Atlântico Leste e do São Francisco.

Nos estados nordestinos que são alcançados pela bacia do Parnaíba (Piauí, Maranhão e Ceará), bacia do Atlântico Leste (Sergipe e Bahia) e bacia do Rio São Francisco (Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Bahia), as projeções evidenciaram redução da precipitação nos modelos Eta-HadGEM2-ES, Eta-CanESM2 e Eta-MIROC5 no presente estudo, e esses resultados são mais expressivos sob o RCP8.5. Cenário oposto foi observado por meio do modelo Eta-BESM. Segundo as projeções realizadas com esse modelo, os estados do Nordeste apresentarão um aumento elevado na precipitação nos cenários RCP4.5 e RP8.5.

4.4. Conclusão

O presente estudo teve por objetivo projetar as condições de precipitação para 2041-2069 e 2070-2099 a partir de quatro modelos climáticos globais associados a um regional utilizando os cenários RCP4.5 e RCP8.5. Os resultados do modelo Eta-BESM

chamam a atenção devido a projeções de aumento extremo nas chuvas nos dois cenários. No caso dos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5 também houve projeções de aumento da precipitação para algumas áreas pontuais na região Nordeste, todavia, os resultados foram muito diferentes das projeções excessivas do modelo Eta-BESM.

O modelo Eta-CanESM2 foi o único em que os dados projetados indicaram que ao se comparar o período histórico com futuro sob os cenários RCP a precipitação se reduzirá em todo Nordeste, sendo as maiores reduções sob o cenário RCP8.5 sobretudo em 2070-2099.

Apesar da diferença na precipitação apresentada entre os modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5, as projeções demonstraram uma redução para a maior parte do Nordeste do Brasil. Com base no cálculo e interpretação do desvio padrão, percebeu-se que o modelo Eta-BESM apresentou a maior variabilidade nos resultados, enquanto os outros modelos mostraram resultados bem próximo, sendo que o modelo Eta-MIROC5 evidenciou a menor dispersão para os dados projetados.

Na região estudada, conhecida como uma área que enfrenta enormes problemas de escassez de água, principalmente na parte do semiárido, os resultados predominantes a respeito da redução da precipitação poderão gerar um cenário mais crítico. A mudança no comportamento da precipitação diante das alterações no clima evidenciará a vulnerabilidade na produção agrícola, abastecimento e setor energético. Esses fatores deixam claro a necessidade de um planejamento e reflexões de toda a comunidade científica, gestores e população com foco nas adaptações às mudanças climáticas para que a região Nordeste seja capaz de ser resiliente diante das mudanças.

4.5. Referências

ALMAGRO, A.; OLIVEIRA, P. T. S.; ROSOLEM, R.; HAGEMANN, S.; NOBRE, C. A. Performance evaluation of Eta/HadGEM2-ES and Eta/MIROC5 precipitation simulations over Brazil. **Atmospheric Research**, v. 244, n. May, p. 105053, 2020.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. DE. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

BENDER, F. D.; SENTELHAS, P. C. Solar radiation models and gridded databases to fill gaps in weather series and to project climate change in Brazil. **Advances in Meteorology**, v. 2018, 2018.

BESM. Brazilian Earth System Model. Disponível em: <http://www.inpe.br/BESM/>. Acesso em: 02/03/2021

BRAZIL. Third National Communication of Brazil to the United Nations Framework Convention on Climate Change – Executive Summary. Ministry of Science, Technology and Innovation Secretariat of Policies and Programs of Research and Development General Coordination of Global Climate Change. Brasília, 2016.

BRONSTERT, A.; GUNTNER, A.; ARAUJO, J. C DE.; JAEGER, A. Possible climate change impacts on water resources availability in a large semiarid catchment in Northeast Brazil. **IAHS-AISH Publication**, n. 295, p. 221–230, 2005.

CARVALHO, A. L DE.; MENEZES, R. S. C.; NÓBREGA, R. S.; PINTO, A DE. S.; OMETTO, J. P H. B.; RANDOW, C. V.; GIAROLLA. A. Impact of climate changes on potential sugarcane yield in Pernambuco, northeastern region of Brazil. **Renewable Energy**, v. 78, p. 26–34, 2015.

CHOU, S. C.; MARENGO, J. A.; LYRA, A. A.; SUEIRO, G.; PESQUERO, J. F.; ALVES, L. M.; KAY, G.; BETTS, R.; CHAGAS, D. J.; GOMES, J. L.; BUSTAMANTE, J. F.; TAVARES, P. Downscaling of South America present climate driven by 4-member HadCM3 runs. **Climate Dynamics**, v. 38, n. 3–4, p. 635–653, 2012.

CHOU, S.C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DEREZYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.; BUSTAMANTE, J.; TAVARES, P.; SILVA, A.; RODRIGUES, D.; CAMOS, D.; CHAGAS, D.; SUEIRO, G.; SIQUEIRA, G.; NOBRE, P.; MARENGO, J. Evaluation of the Eta Simulations Nested in Three Global Climate Models. **American Journal of Climate Change**, 3, 438-454, 2014a. Disponível em: http://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx?PaperID=52887#.VakHg_IViko. Acesso em: 27/08/2020.

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**, 3, 512-527, 2014b. Disponível em: http://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx?PaperID=52877#.VakIh_IVikp. Acesso em: 27/08/2020.

COSTA, R. L.; BAPTISTA, G. M DE. M.; GOMES, H. B.; SILVA, F. D DOS. S.; ROCHA JÚNIOR, R.; L DA.; SALVADOR, M DE. A.; HERDIES, D. L. Analysis of climate extremes indices over northeast Brazil from 1961 to 2014. **Weather and Climate Extremes**, v. 28, 2020.

EK, M.; MITCHELL, K.E.; LIN, Y.; ROGERS, E.; GRUNMANN, P.; KOREN, V.; GAYNO, G; TARPLEY, J.D. 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.

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.

GONDIM, R. S.; CASTRO, M. A. H DE.; MAIA, A DE. H. N.; EVANGELISTA, S. R. M.; FUCK, S DE. F. Climate Change Impacts on Irrigation Water Needs in the jaguaribe River Basin. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 48, n. 2, p. 355–365, 2012.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2017. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>. Acesso em: 31/08/2020.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cidades e Estados, 2019. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados.html?view=municipio>. Acesso em: 22/06/2020.

JIA, G., SHEVLIAKOVA, E.; ARTAXO, P.; NOBLET-DUCOUDRÉ, N De.; HOUGHTON, R.; HOUSE, J.; KITAJIMA, K.; LENNARD, C.; POPP A.; SIRIN, A.; SUKUMAR, R.; VERCHOT, L. 2019: Land–climate interactions. In: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M, Belkacemi, J. Malley, (eds.)]. In press.

KROL, M. S.; BRONSTERT, A. Regional integrated modelling of climate change impacts on natural resources and resource usage in semi-arid Northeast Brazil. **Environmental Modelling and Software**, v. 22, n. 2, p. 259–268, 2007.

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.

LIMA, F. J. L DE.; MARTINS, F. R.; COSTA, R. S.; GONÇALVES, A. R.; SANTOS, A. P. P DOS.; PEREIRA, E. B. The seasonal variability and trends for the surface solar irradiation in northeastern region of Brazil. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 35, n. August, p. 335–346, 2019.

LUCENA, A. F. P DE.; SZKLO, A.; SCHAEFFER, R.; SOUZA, R. R DE. The vulnerability of renewable energy to climate change in Brazil. **Energy Policy**, v. 37, n. 3, p. 879–889, 2009.

LUCENA, A. F. P DE, SCHAEFFER, R.; SZKLO, A. S. Least-cost adaptation options for global climate change impacts on the Brazilian electric power system. **Global Environmental Change**, v. 20, n. 2, p. 342–350, 2010.

LYRA, A.; TAVARES, P.; CHOU, S. C.; SUEIRO, G.; DERECZYNSKI, C.; SONDERMANN, M.; SILVA, A.; MARENGO, J.; GIAROLLA, A. Climate change projections over three metropolitan regions in Southeast Brazil using the non-hydrostatic Eta regional climate model at 5-km resolution Theor Appl Climatol. 2017. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00704-017-2067-z>. Acesso em: 29/07/2020.

MARENGO, J. A.; JONES, R.; ALVES, L. M.; VALVERDE, M. C. Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system. **International Journal of Climatology**, v. 29, n. March 2008, p. 2241–2255, 2009.

MARENGO, J. A.; CHOU, S. C.; KAY, G.; ALVES, L. M.; PESQUERO, J. F.; SOARES, W. R.; SANTOS, D. C.; LYRA, A. A.; SUEIRO, G.; BETTS, R.; CHAGAS, D. J.; GOMES, L. L.; BUSTAMANTE, J. F.; TAVARES, P. Development of regional future climate change scenarios in South America using the Eta CPTEC/HadCM3 climate change projections: Climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Paraná River basins. **Climate Dynamics**, v. 38, n. 9–10, p. 1829–1848, 2012.

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.

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.

MARTIN, G. M.; BELLOUIN, N.; COLLINS, W. J.; CULVERWELL, I. D.; HALLORAN, P. R.; HARDIMAN, S.C.; HINTON, T. J.; JONES, C. D.; MCDONALD, R.E; MCLAREN, A. J.; O’CONNOR, F. M.; ROBERTS, M. J.; RODRIGUEZ, J. M.; WOODWARD, S.; BEST, M. J.; BROOKS, M. E.; BROWN, A.; R.; BUTCHART, N.; DEARDEN, C.; DERBYSHIRE, S. H.; Dharssi, I.; DOUTRIAUX-BOUCHER, M.; EDWARDS, J. M.; FALLOON, P. D.; GEDNEY, N.; GRAY, L. J.; HEWITT, H. T.; HOBSON, M.; HUDDLESTON, M. R.; HUGHES, J.; INESON, S.; INGRAM, W. J.; JAMES, P. M.; JOHNS, T. C.; JOHNSON, C. E.; JONES, A.; JONES, C. P.; JOSHI, M. M.; KEEN, A. B.; LIDDICOAT, S.; LOCK, A. P.; MAIDENS, A. V.; MANNERS, J. C.; MILTON, S. F.; RAE, J. G.L.; RIDLEY, J. K.; SELLAR, A.; SENIOR, C. A.; TOTTERDELL, I. J.; VERHOEF, A.; VIDALE, P. L., WILTSHIRE, A. The HadGEM2 family of Met Office Unified Model climate configurations. **Geoscientific Model Development**, v. 4, n. 3, p. 723–757, 2011.

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.

NOAA. National Oceanic and Atmospheric Administration. The First Climate Model. 2017. Disponível em: http://celebrating200years.noaa.gov/breakthroughs/climate_model/. Acesso em: 22/06/2020.

NOBRE, P.; SIQUEIRA, L. S. P.; ALMEIDA, R. A. F DE.; MALAGUTTI, M.; GIAROLLA, E.; CASTELÃO, G. P.; BOTTINO, M. J.; KUNOTA, P.; FIGUEROA, S. N.; COSTA, M. C.; BAPTISTA JÚNIOR, M.; IRBER JÚNIOR. L.; MARCONDES, G. G. Climate simulation and change in the brazilian climate model. **Journal of Climate**, v. 26, n. 17, p. 6716–6732, 2013.

QUEIROZ, A. R DE.; LIMA, L. M. M.; LIMA, J. W. M.; SILVA, B. C DE.; 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.

RIAHI, K.; RAO, S.; KREY, V.; CHO, C.; CHIRKOV, V.; FISCHER, G.; KINDERMANN, G.; NAKICENOVIC, N.; RAFAJ, P. RCP 8.5-A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. **Climatic Change**, v. 109, n. 1, p. 33–57, 2011.

RUFFATO-FERREIRA, V.; BARRETO, R DA. C.; OSCAR JÚNIOR, A.; SILVA, L. W.; VIANA, D DE. B.; NASCIMENTO, J. A S DO.; FREITAS, M. A. V DE. 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, n. October 2015, p. 1124–1137, 2017.

SILVA, R. R. DA; HAAS, R. Ocean global warming impacts on the South America climate. **Frontiers in Earth Science**, v. 4, n. March, p. 1–8, 2016.

SILVA, W. K. DE M.; FREITAS, G. P DE.; COELHO JUNIOR, L. M.; PINTO, P. A. L DE. A.; ABRAHÃO, R. Effects of climate change on sugarcane production in the state of Paraíba (Brazil): a panel data approach (1990–2015). **Climatic Change**, v. 154, n. 1–2, p. 195–209, 2019.

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.

THOMSON, A. M.; CALVIN, K. V.; SMITH, S. J.; KYLE, G. P.; VOLKE, A.; PATEL, P.; DELGADO-ARIAS, S.; WISE, M. A.; CLARKE, L. E.; EDMONDS, J. A. RCP4.5: A pathway for stabilization of radiative forcing by 2100. **Climatic Change**, v. 109, n. 1, p. 77–94, 2011.

VEIGA, S. F.; NOBRE, P.; GIAROLLA, E.; CAPISTRANO, V.; BAPTISTA, M.; MARQUEZ, A. L.; NILO, F. S.; BONATTI, J. P.; KUBOTA, P.; NOBRE, C. A. 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.

WATANABE, M.; SUZUKI, T.; O'ISHI, R.; KOMURO, Y.; WATANABE, S.; EMORI, S.; TAKEMURA, T.; CHIKIRA, M.; OGURA, T.; SEKIGUCHI, M.; TAKATA, K.; YAMAZAKI, D.; YOKOHATA, T.; NOZAWA, T.; HASUMI, H.; TATEBE, H.; KIMOTO, M. Improved climate simulation by MIROC5: Mean states, variability, and climate sensitivity. **Journal of Climate**, v. 23, n. 23, p. 6312–6335, 2010.

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.

CAPITULO 5

PROJEÇÕES DE VELOCIDADE DOS VENTOS PARA A REGIÃO NORDESTE DO BRASIL A PARTIR DA APLICAÇÃO DE UM CONJUNTO DE MODELOS CLIMÁTICOS

Resumo

A matriz energética brasileira é majoritariamente composta pela geração de energia a partir de fontes renováveis e uma destas é a produção de eletricidade a partir dos ventos. A capacidade eólica do Brasil cresce anualmente e a região Nordeste tem um grande destaque. Por sua vez, sabe-se que as mudanças climáticas podem interferir nas características dos ventos e com isso causar impactos na geração eólica. Os modelos climáticos globais (GCM's) e regionais (RCM) projetam as condições climáticas futuras de inúmeros parâmetros climáticos, incluindo a velocidade dos ventos. O presente artigo teve como propósito projetar dados de velocidade dos ventos a 10 m e a 100 m para a região Nordeste do Brasil empregando três modelos climáticos globais (BESM, HadGEM2-ES e CanESM2) e o modelo climático regional (Eta). Associados a estes utilizou-se os cenários RCP4.5 e RCP8.5 no período de 2041-2069 e 2070-2099 e como referência o período de 1961-1990. Os resultados indicaram que, no geral, a região Nordeste do Brasil terá um aumento futuro na velocidade dos ventos a 10 m e a 100 m, sobretudo no cenário RCP8.5 e de forma mais intensa na área a oeste da região, o que pode ser um indicativo de um cenário mais favorável para a produção eólica nessa área.

Palavras-chave: Mudanças climáticas, RCP4.5, RCP8.5, projeções climáticas, parques eólicos, energia eólica.

Abstract

The Brazilian energy matrix is mainly composed of the generation of energy from renewable sources and one of these is the production of electricity from the winds. Brazil's wind capacity grows annually and the Northeast region has a great prominence. In turn, it is known that climate change can interfere with the characteristics of the winds and thereby cause impacts on wind generation. Global (GCM's) and regional (RCM) climate models project future weather conditions for numerous climate parameters, including wind speeds. The purpose of this article was to project wind speed data at 10 m and 100 m for the Northeast region of Brazil using three global climate models (BESM, HadGEM2-ES and CanESM2) and the regional climate model (Eta). Associated with these, the scenarios RCP4.5 and RCP8.5 were used in the period of 2041-2069 and 2070-2099 and as a reference the period of 1961-1990. The results indicated that, in general, the Northeast region of Brazil will have a future increase in wind speeds at 10 m and 100 m, especially in the RCP8.5 scenario and more intensely in the area to the west of the region, which can be a indicative of a more favorable scenario for wind production in this area.

Keywords: Climate change, RCP4.5, RCP8.5, climate projections, wind farms, wind energy.

5.1. Introdução

A produção eólica mundial vem crescendo anualmente, em 2013 a produção foi de 318.918 MW e em 2019 alcançou 650.758 MW (WWEA, 2020). O Brasil é um dos responsáveis por esse aumento, segundo a Abeeolica (2019) a capacidade eólica instalada no país em 2019 foi de 15.449 MW. De acordo com a Aneel (2020) a matriz energética renovável brasileira corresponde a 82,80% e destes, a energia eólica representa 9,34% o que equivale a potência de 16.208,82 MW.

Dos cinco estados brasileiros com maior geração eólica em 2019 quatro estão localizados no Nordeste: Bahia (16,83 TWh), Rio Grande do Norte (14,09 TWh), Piauí (6,34 TWh) e Ceará (6,02 TWh) (ABEEOLICA, 2019).

Sabendo que a produção eólica depende, entre outros aspectos, das condições dos ventos e preocupando-se com as alterações que as mudanças no clima podem causar a disponibilidade e as características destes (LIZUMA *et al.*, 2013; KOLETIS *et al.*, 2016) são utilizados os modelos climáticos globais e regionais, os quais buscam projetar possíveis condições climáticas futuras utilizando parâmetros de temperatura, precipitação, velocidade dos ventos, entre outros (PAŠIČKO; BRANKOVIĆ; ŠIMIĆ, 2012; QUEIROZ *et al.*, 2016). De acordo com o NOAA (2017), os modelos climáticos globais são ferramentas que utilizam fórmulas matemáticas a fim de representar os processos químicos e físicos atmosféricos relacionando-os com os componentes do sistema climático.

Associados aos modelos são utilizados os cenários ou Caminhos Representativos de Concentração (RCP) dos relatórios do IPCC. Os cenários não levam em consideração apenas a emissão e a concentração dos gases de efeito estufa na atmosfera, mas também ações de mitigação, características econômicas, sociais, populacionais, entre outros (HDIDOUAN; STAFFELL, 2017; MÜLLER *et al.*, 2019).

Tendo em vista que a velocidade do vento é o principal fator para a geração de energia eólica e que as mudanças climáticas podem alterar as características dos ventos e, portanto gerar condições mais favoráveis ou adversas para a produção eólica futura. Desta forma, alguns estudos preocuparam-se em projetar possíveis mudanças na velocidade dos ventos pelo mundo (CARVALHO *et al.*, 2017; SOLAUN; CERDA, 2020).

Na Península Ibérica, por exemplo, Santos *et al.* (2015) e Santos *et al.* (2018) projetaram redução futura na velocidade e na potência dos ventos. No noroeste da

Alemanha, as projeções de Wachsmuth *et al.* (2013) indicaram o aumento da velocidade dos ventos no inverno e uma redução para o verão até o final do século XXI.

Utilizando um conjunto com 12 modelos do NA-CORDEX, as projeções realizadas por Chen (2020) para a América do Norte verificaram a possível redução da produção eólica em parte do oeste e da costa leste dos Estados Unidos, mas aumento no Texas e Oklahoma (verão), nas Grandes Planícies (primavera) e nas Planícies do norte e centro-oeste (inverno e primavera).

Estudos realizados no Brasil destacaram o cenário favorável para a produção de energia a partir dos ventos (RUFFATO-FERREIRA *et al.*, 2017; DE JONG *et al.*, 2019). Para a região Nordeste do país, além de Ruffato-Ferreira *et al.* (2017) e do De Jong *et al.* (2019), De Jong *et al.* (2017) também projetaram o aumento potencial do recurso eólico na maior parte do ano, com exceção do outono.

Tendo em vista as alterações climáticas e os impactos que podem causar, principalmente na região Nordeste, a qual possui um grande potencial eólico, este trabalho tem por objetivo projetar as condições futuras para a velocidade dos ventos a 10 m e 100 m, utilizando os modelos climáticos Eta-BESM, Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 para 2041-2069 e 2070-2099 comparados ao período de 1961-1990.

5.2. Metodologia

5.2.1. Caracterização da área de estudo

O Nordeste do Brasil é banhado pelo Oceano Atlântico e localiza-se no extremo leste da América do Sul (COSTA *et al.*, 2020). É a segunda maior região do país (LIMA *et al.*, 2019) com uma área correspondente a aproximadamente 1.552.167,01 km² de extensão dividida em nove estados e população estimada em 57.374.243 pessoas em 2020 (IBGE, 2019; IBGE, 2020).

Segundo a classificação de Köppen-Geiger, o clima da região Nordeste se divide em três tipos climáticos: clima tropical, clima semiárido e clima subtropical úmido (ALVARES *et al.*, 2013). A região é conhecida por ser uma área de temperaturas elevadas, com resultados médios que variam de 20°C a 28°C e alta variabilidade espacial na precipitação (LIMA *et al.*, 2019; COSTA *et al.*, 2020).

A região Nordeste se destaca pela produção eólica, com 558 empreendimentos em operação, o que corresponde a uma potência outorgada de 14.24.289,05 MW. O único estado a não ter nenhum parque eólico instalado é o de Alagoas (ANEEL, 2021).

5.2.2. Dados dos modelos climáticos

As projeções foram derivadas de três modelos climáticos globais (BESM, HadGEM2-ES e CanESM2) (ANEXO I) e um modelo climático regional (Eta), todos 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.*, 2017).

O BESM é o modelo brasileiro desenvolvido pelo INPE fundamentado na estrutura do modelo oceano-atmosfera do CPTEC (VEIGA *et al.*, 2019), acoplado ao modelo oceânico MOM4 (*Modular Ocean Model 4*). Os seus processos da superfície terrestre são representados a partir do modelo SSIB (Modelo Simples da Biosfera) (CHOU *et al.*, 2014a).

O modelo HadGEM2-ES é a segunda versão do modelo da família HadGEM, o qual teve a adição da química troposférica, processos do ciclo do carbono, adição de componentes do gelo marinho, entre outros (MARTIN *et al.*, 2011).

A segunda geração do modelo canadense do sistema terrestre, CanESM2, consiste no modelo físico oceânico atmosférico (CanCM4), aninhado ao modelo de carbono terrestre (CTEM) e também a um modelo carbônico oceânico (CMOC) (SOSPEDRA-ALFONSO; MERRYFIELD, 2017).

Por fim, no modelo regional Eta os processos de superfície terrestre 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 curtas é representada em Lacis e Hansen (1974), e a radiação de ondas longas em Fels e Schwarzkopf (1975).

Foram utilizados os cenários RCP4.5 e RCP8.5, tomando-se o cenário RCP4.5 como o mais otimista entre esses dois, onde medidas para mitigação da emissão e concentração dos efeitos de estufa serão tomadas e, com isso, a estabilização da forçante radioativa ficaria em 4,5 W/m². Dessa forma, a concentração de CO₂ se estabilizaria após 2100 em 650 ppm (THOMSON *et al.*, 2011). O RCP8.5 é considerado o mais pessimista dos cenários, com um forçamento radioativo de 8,5 W/m² até o final do século XXI, tendo

em vista as altas emissões, a ausência de medidas de mitigação das emissões, entre outros aspectos. Desta forma, a concentração de CO₂ ficaria acima de 1370 ppm e continuaria aumentando após 2100 (RIAHI *et al.*, 2011).

Para realizar as projeções levou-se em consideração os períodos futuros de 2041-2069 e 2070-2099 comparados ao período de referência de 1961-1990, por ser considerado uma normal climatológica de referência, em 3237 pontos os quais encontram-se a uma distância de aproximadamente 22,3 km um do outro, alcançando toda extensão da região Nordeste do Brasil para avaliar a velocidade futura dos ventos a 10 m e a 100 m.

5.3. Resultados e discussão

As projeções derivadas dos modelos climáticos Eta-BESM, Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 para a velocidade dos ventos a 10 m e a 100 m podem ser observadas na Figura 5.1 e Figura 5.2.

No geral, os resultados mostraram o provável aumento para a velocidade dos ventos a 10 m e a 100 m na região Nordeste sobretudo ao final do século XXI. As projeções derivadas dos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 evidenciaram que o aumento das velocidades dos ventos a 10 e a 100 m será mais intenso na área a oeste do estado do Maranhão. No caso do modelo Eta-BESM sob o RCP4.5, a elevação é maior em parte do estado da Bahia nos dois períodos futuros analisados, tanto para a velocidade dos ventos a 10 m quanto a 100 m (Figura 5.1 e Figura 5.2).

Para os períodos de 2010-2040, 2041-2070 e 2071-2100 Ruffato-Ferreira *et al.* (2017) com o modelo Eta-HadGEM2-ES projetaram o aumento da velocidade do vento a 100 m para todo o Nordeste. De acordo com Eichelbergr *et al.* (2008) a velocidade dos ventos a 10 m aumentará futuramente na maior parte do planeta, incluindo partes do Nordeste do Brasil.

Apesar das projeções de aumento das velocidades dos ventos serem predominantes em alguns pontos é possível observar possíveis diminuições (Figura 5.1 e Figura 5.2). As reduções das velocidades dos ventos a 10 m e a 100 m foram notadas em todos os cenários com resultados mais intensos sob o RCP8.5 sobretudo em 2070-2099 nos modelos Eta-BESM e Eta-CanESM2. No caso do Eta-HadGEM2-ES, as projeções de redução ocorrerão de forma mais intensas sob o RCP4.5 (Figura 5.1 e Figura 5.2).

Os resultados evidenciaram diminuições em algumas áreas, principalmente nos estados do Rio Grande do Norte e da Paraíba. Para esses estados, os resultados estão de acordo com o previsto por De Jong *et al.* (2019) no período de 2070-2099 sob o RCP8.5.

Como pode ser observado na Figura 5.1 e Figura 5.2, há projeções de reduções da velocidade dos ventos a 10 m e a 100 m na costa nordestina foram projetados em todos os modelos aplicados, principalmente sob o RCP8.5 no modelo Eta-CanESM2 para a velocidade dos ventos a 10 m. A partir do modelo HadCM3, Lucena, Schaeffer e Szklo (2010) projetaram aumento considerável da velocidade do vento nas regiões costeiras e no Nordeste do Brasil, sendo acima de 20% na maior parte do Nordeste em 2091-2100 e acima de 10% no período de 2071-2080 e 2081-2090 no cenário A2.

Para a costa do estado da Bahia, Pereira *et al.* (2013) projetaram redução da densidade eólica para os períodos de outono em 2070-2100. No presente estudo, previu-se que a costa baiana poderá sofrer com reduções na velocidade dos ventos a 10 m e a 100 m, principalmente no cenário mais pessimista sobretudo em 2070-2099 no modelo Eta-CanESM2.

Tendo em vista observar a dispersão dos dados nos modelos climáticos empregados, neste estudo, calculou-se o desvio padrão para a velocidade dos ventos a 10 m e a 100 m. De acordo com os resultados, o modelo Eta-BESM apresentou os menores valores para o desvio padrão, o que indica que o conjunto de dados é mais uniforme, ou seja, são mais homogêneos (Tabela 5.1 e Tabela 5.2).

Tabela 5.1: 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 velocidade dos ventos a 10 m.

	Eta-BESM		Eta-HadGEM2-ES		Eta-CanESM2	
	Média (%)	DP (%)	Média (%)	DP (%)	Média (%)	DP (%)
RCP4.5 (41-69)	2,4	1,7	1,7	3,4	5,3	3,5
RCP4.5 (70-99)	1,9	1,4	3,3	4,3	6,4	5,4
RCP8.5 (41-69)	2,7	2,6	7,4	5,8	6,4	7,0
RCP8.5 (70-99)	4,5	4,7	11,1	9,9	12,3	13,0
Valores médios	2,9	2,6	5,9	5,8	7,6	7,2

Tabela 5.2: 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 velocidade dos ventos a 100 m.

	Eta-BESM		Eta-HadGEM2-ES		Eta-CanESM2	
	Média (%)	DP (%)	Média (%)	DP (%)	Média (%)	DP (%)
RCP4.5 (41-69)	2,5	1,9	1,8	3,7	5,5	3,8
RCP4.5 (70-99)	1,9	1,6	3,3	4,5	6,3	5,1
RCP8.5 (41-69)	2,4	2,8	7,5	5,8	6,5	7,1
RCP8.5 (70-99)	4,2	5,0	11,2	10,0	12,8	12,5
Valores médios	2,7	2,8	5,9	6,0	7,7	7,1

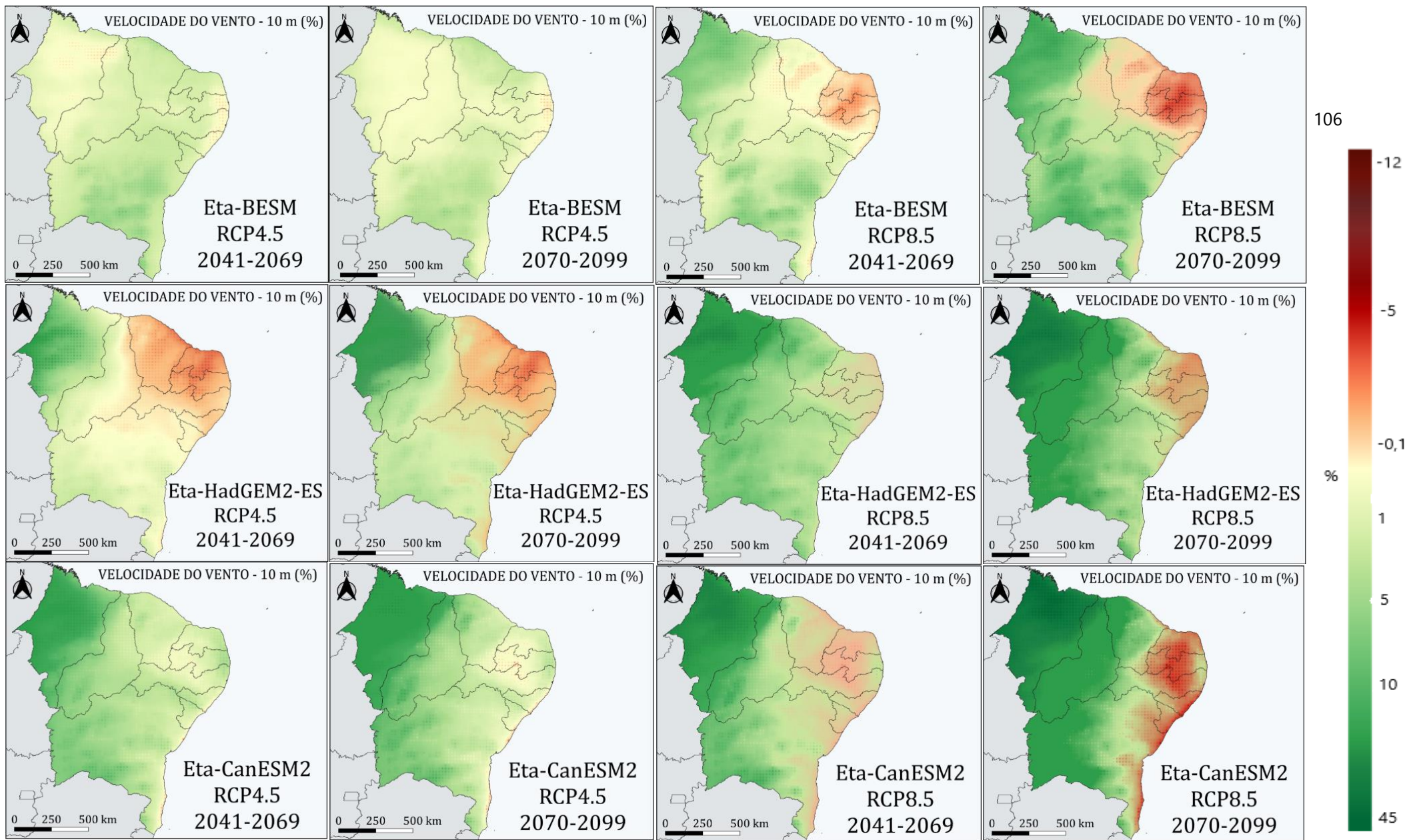


Figura 5.1: Anomalias projetadas para a velocidade dos ventos a 10 m nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 nos períodos de 2041-2069 e 2070-2099 para os modelos Eta-BESM, Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 na região Nordeste do Brasil.

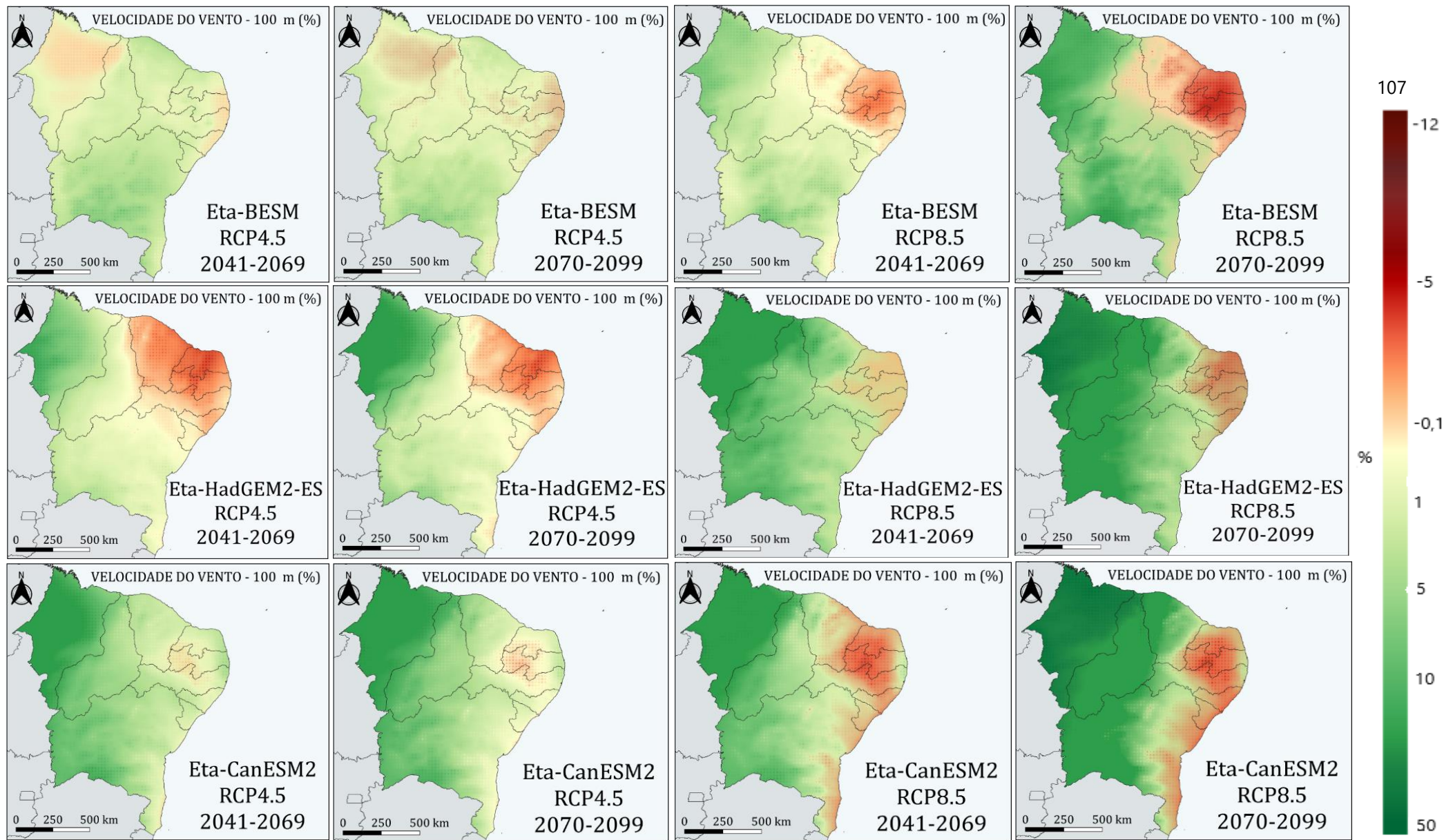


Figura 5.2: Anomalias projetadas para a velocidade dos ventos a 100 m nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 nos períodos de 2041-2069 e 2070-2099 para os modelos Eta-BESM, Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 na região Nordeste do Brasil.

Os estados do Rio Grande do Norte e Bahia possuem o maior número de parques eólicos em operação e a maior potência outorgada, sendo 172 parques no Rio Grande do Norte e potência de 4.801.336,00 MW e a Bahia com potência de 4.648,55 MW e 184 parques em operação (ANEEL, 2020) (Tabela 5.1).

Tabela 5.3: Dados de potência dos parques eólicos em operação nos estados da região Nordeste do Brasil em 2020. Fonte: Aneel (2020).

Estado	Potência Outorgada MW	Quantidade de Parques Eólicos
Sergipe	34,50	1
Paraíba	157,20	15
Maranhão	426,02	16
Pernambuco	800,35	35
Ceará	2.188,84	86
Bahia	4.648,55	184
Piauí	2.055.55,00	72
Rio Grande do Norte	4.801.336,00	172

Observando a Figura 5.3 percebe-se que os parques eólicos em operação do estado do Rio Grande do Norte estão em sua maioria localizados perto da costa, a qual poderá ser afetada pela redução da velocidade dos ventos de acordo com as projeções realizadas nos três modelos aplicados no presente estudo (Figura 5.2).

Para o modelo Eta-CanESM2 no cenário mais pessimista observa-se redução mais acentuada da velocidade dos ventos a 100 m em alguns pontos na região Nordeste, principalmente nos estados da Paraíba e Rio Grande do Norte. Essas áreas de diminuição poderão alcançar os municípios de São José de Sabugi, Santa Luzia e Natuba (estado da Paraíba) e os municípios de Tenente Lourentino Cruz, Lagoa Nova, Santana do Matos, Bodó e Cerro Cará (estado do Rio Grande do Norte) os quais têm empreendimentos eólicos em operação e também áreas onde há parques em construção em ambos os estados (Figura 5.3).

As projeções para os estados do Ceará, Pernambuco, Paraíba e Sergipe também evidenciaram possíveis reduções principalmente sob o RCP8.5 no Eta-BESM e no cenário RCP4.5 no Eta-HadGEM2-ES sobretudo em 2041-2069 e no modelo Eta-CanESM2 no cenário mais pessimista nas regiões onde estão presentes os parques eólicos (Figura 5.2 e Figura 5.3).

Projeções realizadas em outras áreas pelo mundo também demonstraram que as mudanças climáticas influenciarão na velocidade dos ventos. Os resultados projetados por Solaun e Cerda (2020) para quatro parques eólicos na Espanha nos períodos de 2018-2041 e 2042-2065 sugeriram uma redução na velocidade dos ventos e na produção eólica no parque eólico de *Cuadramón* (localizado na Galícia) e no parque eólico de *Rubió* (localizado na Catalunha). Por sua vez, os resultados para o parque eólico de *Río Almodóvar* (localizado em Andaluzia) indicaram possível aumento da velocidade dos ventos e da produção eólica. Por fim, segundo os autores ocorrerá uma variabilidade a depender do cenário futuro empregado no parque eólico de *El Pérdon* (localizado em Navarre).

Tendo em vista o observado na Figura 5.3, no município de Barra de Coqueiros, onde está situado o único empreendimento eólico do estado do Sergipe (próximo à costa) apresentou variabilidade na velocidade dos ventos a 100 m com cenários de aumento ou redução a depender do cenário e modelo empregado.

Projeções realizadas por Wang, Ullrich e Millstein (2018), em cinco parques eólicos na Califórnia-EUA, indicaram o possível aumento do recurso eólico no verão e diminuição no inverno e outono sob o RCP8.5. Segundo os autores a produção anual diminuirá em todos os locais, exceto em *Altamont Pass*.

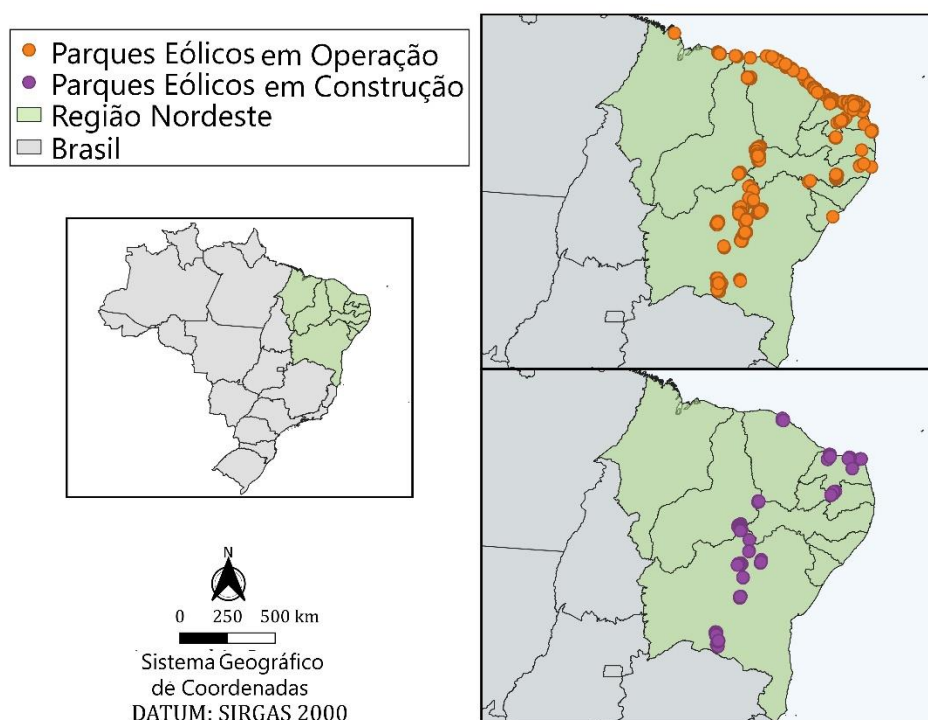


Figura 5.3: Mapa de localização dos empreendimentos eólicos da Região Nordeste do Brasil. Adaptado de IBGE (2017); ANEEL (2020).

O estado do Maranhão, segundo a Aneel (2020), tem 16 empreendimentos eólicos em operação com potência outorgada de 426,02 MW (Tabela 5.1) que estão localizados nos municípios de Barreirinhas, Paulino Neves e Cururupu. Conforme os resultados projetados no presente trabalho, todos os modelos evidenciaram o aumento da velocidade dos ventos a 100 m para estas áreas, principalmente para o final do século XXI sob o RCP8.5. Resultados positivos para as condições do vento no estado do Maranhão, incluindo a parte norte, onde estão os empreendimentos eólicos, também foram previstos por Lucena, Schaeffer e Szklo (2010).

Os parques em construção no estado do Piauí estão localizados em áreas onde as projeções indicaram aumento da velocidade dos ventos a 100 m em todos os modelos aplicados, com exceção do Eta-BESM e do Eta-HadGEM2-ES em alguns pontos sob o cenário mais otimista. Os resultados apresentados por Zhang *et al.* (2018) sugeriram um cenário eólico favorável em várias regiões pelo mundo no século XXI, incluindo o Nordeste do Brasil sob o RCP2.6, não estudado aqui, e o RCP8.5.

Apesar das projeções de redução em alguns pontos para o Nordeste, o aumento da velocidade dos ventos a 100 m ainda é predominante. Segundo as projeções de Reboita, Amaro e Souza (2018), a partir do RegCM4 sob o RCP8.5, em 2020-2050 e

2070-2098, algumas regiões da América do Sul, incluindo o Nordeste do Brasil, são locais promissores para a instalação de parques eólicos. Segundo os autores, o aumento da potência da densidade dos ventos a 100 m crescerá em torno de 40% em 2070-2098. Durante o outono essa elevação pode chegar a 100% no leste da região Nordeste do Brasil (REBOITA; AMARO; SOUZA, 2018).

5.4. Conclusão

O presente trabalho empregou um conjunto com três modelos climáticos globais (BESM, HadGEM2-ES, CanESM2) associados ao modelo climático regional Eta a fim de prever o cenário climático da velocidade dos ventos a 10 m e a 100 m nos períodos futuros de 2041-2069 e 2070-2099, comparando-os com o período de referência de 1961-1990 e levando em consideração os cenários RCP4.5 e RCP8.5.

Os resultados apresentados sugeriram que nos cenários futuros a velocidade dos ventos a 10 m e a 100 m na região Nordeste aumentarão, principalmente sob o RCP8.5 ao final do século XXI. Comparando os dados obtidos nos modelos utilizados, o Eta-HadGEM2-ES e o Eta-CanEM2 apresentaram as médias mais expressivas de elevação, para todo Nordeste, sendo acima de 12% neste e 11% naquele para o final do século XXI sob o cenário mais pessimista. No caso do Eta-BESM, essa média de aumento foi inferior a 5%.

Apesar de prevalecer projeções de que a velocidade dos ventos aumentará no Nordeste do Brasil, algumas localidades poderão sofrer com a redução, principalmente nos estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte, além de parte da costa nordestina em alguns cenários e modelos.

A região Nordeste do Brasil tem um número expressivo de parques eólicos em operação e em construção. Segundo as projeções, pode ocorrer a redução da velocidade dos ventos a 100 m em áreas onde estão localizados alguns desses empreendimentos. É preciso deixar claro que a velocidade do vento não é o único parâmetro a ser observado para a produção eólica. Características da densidade eólica e a cobertura do solo, por exemplo, também são fatores importantes a serem observados, mas não foram o foco do presente estudo.

5.5. Referências

ABEEOLICA - Associação Brasileira de Energia Eólica. Annual Wind Energy Reported 2019. Disponível em: http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2020/07/EN_Boletim-Anual-de-Gera%C3%A7%C3%A3o-2019.pdf. Acesso em: 07/08/2020.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. DE. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

ANEEL. Atlas de Energia Elétrica do Brasil, 3ed; 2008. Disponível em: https://www.aneel.gov.br/documents/656835/14876406/2008_AtlasEnergiaEletricaBrasil3ed/297ceb2e-16b7-514d-5f19-16cef60679fb. Acesso em: 08/10/2020.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica, 2020. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/signa>. Acesso em: 02/10/2020.

BESM. Brazilian Earth System Model. Disponível em: <http://www.inpe.br/BESM/>. Acesso em: 07/08/2020

BRAZIL. Third National Communication of Brazil to the United Nations Framework Convention on Climate Change – Executive Summary. Ministry of Science, Technology and Innovation Secretariat of Policies and Programs of Research and Development General Coordination of Global Climate Change. Brasília, 2016.

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.

CARVALHO, D.; ROCHA, A.; GÓMEZ-GESTEIRA, M.; SANTOS, C. S. Potential impacts of climate change on European wind energy resource under the CMIP5 future climate projections. *Renewable Energy*, v. 101, p. 29-40, 2017.

CHEN, L. Impacts of climate change on wind resources over North America based on NA-CORDEX. *Renewable Energy*, v. 153, p. 1428-1438, 2020.

CHOU, S.C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DEREZYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.; BUSTAMANTE, J.; TAVARES, P.; SILVA, A.; RODRIGUES, D.; CAMOS, D.; CHAGAS, D.; SUEIRO, G.; SIQUEIRA, G.; NOBRE, P.; MARENGO, J. Evaluation of the Eta Simulations Nested in Three Global Climate Models. *American Journal of Climate Change*, 3, 438-454, 2014a. Disponível em: http://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx?PaperID=52887#.VakHg_IViko. Acesso em: 27/08/2020.

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*, 3, 512-527, 2014b. Disponível em: http://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx?PaperID=52877#.VakIh_IVikp.

Acesso em: 07/08/2020.

COSTA, R. L.; BAPTISTA, G. M DE. M.; GOMES, H. B.; SILVA, F. D DOS. S.; ROCHA JÚNIOR, R.; L DA.; SALVADOR, M DE. A.; HERDIES, D. L. Analysis of climate extremes indices over northeast Brazil from 1961 to 2014. **Weather and Climate Extremes**, v. 28, 2020.

DE JONG, P.; DARGAVILLE, R.; SILVER, J.; UTEMBE, S.; KIPERSTOK, A.; TORRES, A. T. Forecasting high proportions of wind energy supplying the Brazilian Northeast power system. **Applied Energy**, v. 195, p. 538–555, 2017.

DE JONG, P.; BARRETO, T. B.; TANAJURA, C. A. S.; KOULOUKOUI, D.; ESQUERRE-OLIVEIRA, K. P.; KIPERSTOK, A.; TORRES, E. A. 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.

EICHELBERGER, S.; MCCA, J.; NIJESSEN, B.; WOOD, A. W. Climate Change Effects on Wind Speed. **North American Windpower**, n. January, p. 4, 2008.

EK, M.; MITCHELL, K.E.; LIN, Y.; ROGERS, E.; GRUNMANN, P.; KOREN, V.; GAYNO, G; TARPLEY, J.D. 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.

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.

HDIDOUAN, D.; STAFFELL, I. The impact of climate change on the levelised cost of wind energy. **Renewable Energy**, v. 101, n. June, p. 575–592, 2017.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2017. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>. Acesso em: 31/08/2020.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cidades e Estados, 2019. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados.html?>. Acesso em: 16/09/2020.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cidades e Estados, 2020. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados.html?view=municipio>. Acesso em: 16/09/2020.

KOLETSIS, I.; KOTRONI, V.; LAGOUVARDOS, K.; SOUKISSIAN, T. Assessment of offshore wind speed and power potential over the Mediterranean and the Black Seas under future climate changes. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 60, p. 234–245, 2016.

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.

LIMA, F. J. L DE.; MARTINS, F. R.; COSTA, R. S.; GONÇALVES, A. R.; SANTOS, A. P. P DOS.; PEREIRA, E. B. The seasonal variability and trends for the surface solar irradiation in northeastern region of Brazil. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 35, n. August, p. 335–346, 2019.

LIZUMA, L.; AVOTNIECE, Z.; RUPAINIS, S.; TEILANS, A. Assessment of the Present and Future Offshore Wind Power Potential: A Case Study in a Target Territory of the Baltic Sea Near the Latvian Coast. **The Scientific World Journal**, v. 2013, p. 1–10, 2013.

LUCENA, A. F. P DE, SCHAEFFER, R.; SZKLO, A. S.; DUTRA, R. M. The vulnerability of renewable energy to climate change in Brazil. **Renewable Energy**, v. 35, n. 5, p. 904–912, 2010.

LYRA, A.; TAVARES, P.; CHOU, S. C.; SUEIRO, G.; DERECZYNSKI, C.; SONDERMANN, M.; SILVA, A.; MARENGO, J.; GIAROLLA, A. Climate change projections over three metropolitan regions in Southeast Brazil using the non-hydrostatic Eta regional climate model at 5-km resolution *Theor Appl Climatol*. 2017. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00704-017-2067-z>. Acesso em: 29/07/2020.

MARTIN, G. M.; BELLOUIN, N.; COLLINS, W. J.; CULVERWELL, I. D.; HALLORAN, P. R.; HARDIMAN, S.C.; HINTON, T. J.; JONES, C. D.; MCDONALD, R.E; MCLAREN, A. J.; O'CONNOR, F. M.; ROBERTS, M. J.; RODRIGUEZ, J. M.; WOODWARD, S.; BEST, M. J.; BROOKS, M. E.; BROWN, A.; R.; BUTCHART, N.; DEARDEN, C.; DERBYSHIRE, S. H.; Dharssi, I.; DOUTRIAUX-BOUCHER, M.; EDWARDS, J. M.; FALLOON, P. D.; GEDNEY, N.; GRAY, L. J.; HEWITT, H. T.; HOBSON, M.; HUDDLESTON, M. R.; HUGHES, J.; INESON, S.; INGRAM, W. J.; JAMES, P. M.; JOHNS, T. C.; JOHNSON, C. E.; JONES, A.; JONES, C. P.; JOSHI, M. M.; KEEN, A. B.; LIDDICOAT, S.; LOCK, A. P.; MAIDENS, A. V.; MANNERS, J. C.; MILTON, S. F.; RAE, J. G.L.; RIDLEY, J. K.; SELLAR, A.; SENIOR, C. A.; TOTTERDELL, I. J.; VERHOEF, A.; VIDALE, P. L., WILTSHIRE, A. The HadGEM2 family of Met Office Unified Model climate configurations. **Geoscientific Model Development**, v. 4, n. 3, p. 723–757, 2011.

MÜLLER, J.; FOLINI, D.; WILD, M.; PFENNINGER, S. CMIP-5 models project photovoltaics are a no-regrets investment in Europe irrespective of climate change. **Energy**, v. 171, p. 135–148, 2019.

NOAA. National Oceanic and Atmospheric Administration. The First Climate Model. 2017. Disponível em: http://celebrating200years.noaa.gov/breakthroughs/climate_model/. Acesso em: 11/10/2020.

NYASIMI, M. Review of Targets for the Sustainable Development Goals: The Science Perspective. **Journal of Education for Sustainable Development**, v. 9, n. 2, p. 237–237, 2015.

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.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; PES, M. P.; CRUZ SEGUNDO, E. I DA.; LYRA, A DE A. The impacts of global climate changes on the wind power density in Brazil. **Renewable Energy**, v. 49, p. 107–110, 2013.

QUEIROZ, A. R DE.; LIMA, L. M. M.; LIMA, J. W. M.; SILVA, B. C DE.; 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.

REBOITA, M. S.; AMARO, T. R.; SOUZA, M. R DE. Winds: intensity and power density simulated by RegCM4 over South America in present and future climate. **Climate Dynamics**, v. 51, n. 1–2, p. 187–205, 2018.

RIAHI, K.; RAO, S.; KREY, V.; CHO, C.; CHIRKOV, V.; FISCHER, G.; KINDERMANN, G.; NAKICENOVIC, N.; RAFAJ, P. RCP 8.5-A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. **Climatic Change**, v. 109, n. 1, p. 33–57, 2011.

RUFFATO-FERREIRA, V.; BARRETO, R DA. C.; OSCAR JÚNIOR, A.; SILVA, L. W.; VIANA, D DE. B.; NASCIMENTO, J. A S DO.; FREITAS, M. A. V DE. 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, n. October 2015, p. 1124–1137, 2017.

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, n. 2015, p. 68–80, 2015.

SANTOS, F.; GÓMEZ-GESTEIRA, M.; CASTRO, M DE.; AÑEL, J. A.; CARVALHO, D.; COSTOYA, X.; DIAS, J.M. 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.

SOLAUN, K.; CERDÁ, E. Impacts of climate change on wind energy power – Four wind farms in Spain. **Renewable Energy**, v. 145, p. 1306–1316, 2020.

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.

THOMSON, A. M.; CALVIN, K. V.; SMITH, S. J.; KYLE, G. P.; VOLKE, A.; PATEL, P.; DELGADO-ARIAS, S.; WISE, M. A.; CLARKE, L. E.; EDMONDS, J. A. RCP4.5: A pathway for stabilization of radiative forcing by 2100. **Climatic Change**, v. 109, n. 1, p. 77–94, 2011.

VEIGA, S. F.; NOBRE, P.; GIAROLLA, E.; CAPISTRANO, V.; BAPTISTA, M.; MARQUEZ, A. L.; NILO, F. S.; BONATTI, J. P.; KUBOTA, P.; NOBRE, C. A. 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.

WACHSMUTH, J.; BLOHM, A.; GÖBLING-REISEMANN, S.; EICKEMEIER, T.; GASPER, R.; STÜHRMANN, S. 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.

WANG, M.; ULLRICH, P.; MILLSTEIN, D. The future of wind energy in California: Future projections with the Variable-Resolution CESM. **Renewable Energy**, v. 127, p. 242–257, 2018.

WWEA - World Wind Energy Association, 2020. Disponível em: <https://wwindea.org/organisation/board/>. Acesso em: 07/08/2020.

ZHANG, F.; WANG, C.; XIE, G.; KONG, W.; JIN, S.; HU, J.; CHEN, X. Projection of global wind and solar resources over land in the 21st century. **Global Energy Interconnection**, v. 1, n. 4, p. 443–451, 2018.

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.

CAPITULO 6

PROJEÇÕES DE RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE À SUPERFÍCIE E NEBULOSIDADE PARA A REGIÃO NORDESTE DO BRASIL APLICANDO UM CONJUNTO DE MODELOS CLIMÁTICOS

Resumo

As mudanças climáticas influenciam diretamente nas características do clima, no aumento dos eventos extremos e pode gerar impactos na produção energética, na saúde e na produção alimentar. Variáveis como a radiação solar e a nebulosidade também podem ser influenciadas. Sabe-se que a radiação solar incidente à superfície atua sobre o ciclo hidrológico e o balanço radioativo, o qual também é influenciado pela nebulosidade. Os modelos climáticos globais (GCM) e os modelos climáticos regionais (RCM) projetam dados climáticos futuros baseados em parâmetros de temperatura, precipitação, velocidade dos ventos, radiação, nebulosidade, entre outros, vinculados a cenários RCP. Neste estudo, foram utilizados os modelos Eta-BESM, Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 associados aos cenários RCP4.5 e RCP8.5 a fim de projetar as condições futuras para a radiação solar incidente à superfície e nebulosidade para a região Nordeste do Brasil no período de 2041-2069 e 2070-2099. Os resultados evidenciaram o aumento predominante da radiação solar incidente e a redução da nebulosidade para a maior parte dos modelos climáticos podendo gerar impactos na produção de energia solar fotovoltaica.

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

Abstract

Climate change directly influences the characteristics of the climate, the increase in extreme events and can generate impacts on energy production, health and food production. Variables such as solar radiation and cloudiness can also be influenced. It is known that solar radiation on the surface acts on the hydrological cycle and the radioactive balance, which is also influenced by cloud cover. Global climate models (GCM) and regional climate models (RCM) project future climate data based on parameters of temperature, precipitation, wind speed, radiation, cloud cover, among others, linked to RCP scenarios. In this study, the Eta-BESM, Eta-HadGEM2-ES and Eta-CanESM2 models associated with the scenarios RCP4.5 and RCP8.5 were used in order to project the future conditions for solar radiation on the surface and cloudiness for the Northeast region of Brazil in the period 2041-2069 and 2070-2099. The results showed a predominant increase in incident solar radiation and a reduction in cloud cover for most climate models, which may have an impact on the production of photovoltaic solar energy.

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

6.1. 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, 2015; LEAL FILHO *et al.*, 2018). Os ODS 13 tratam 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, 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 das secas (PRUDHOMME *et al.*, 2013; MARENGO; BERNASCONI 2015; MARENGO; TORRES; ALVES 2017), mudanças na velocidade e na intensidade 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 projetam as condições climáticas futuras de uma região (PAŠIČKO; BRANKOVIĆ; ŠIMIĆ, 2012; QUEIROZ *et al.*, 2016). Junto a estes 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).

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 atmosfera. 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 da energia solar (WILD; GRIESER; SHÄR *et al.*, 2008; WANG *et al.*, 2012; ZHANG *et al.*, 2015;

ZHANG *et al.*, 2016; TAO *et al.*, 2021). A radiação de onda curta incidente é aquela que atinge a superfície terrestre na faixa espectral contida entre 300 nm e 4000 nm (Liang *et al.*, 2010).

Para a produção de energia solar, além da radiação, a cobertura das nuvens é uma propriedade de grande importância a ser considerada. Está será influenciada pelas partículas atmosféricas em suspensão as quais poderão aumentar a cobertura das nuvens (BURNETT; BARBOUR; HARRISON, 2014).

As nuvens são responsáveis por cobrir 60% da superfície terrestre e influenciam no balanço radioativo 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.*, 2013) e junto a elevação solar são os dois fatores que mais influenciam na irradiação solar total (SANTOS; VILLÁN; CASTRILLO, 2011).

Levando em consideração as mudanças climáticas e os impactos que poderão causar no Nordeste do Brasil, o presente artigo teve por finalidade projetar resultados futuros para a radiação solar de onda curta incidente à superfície e a nebulosidade para o período futuro de 2041-2069 e 2070-2099 na região Nordeste do Brasil.

6.2. Metodologia

6.2.1. Caracterização da área de estudo

A região Nordeste está localizada no extremo leste da América do Sul e é banhada pelo Oceano Atlântico (COSTA *et al.*, 2020), sendo a segunda 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 e possui população estimada de 57.374.243 pessoas em 2020 (IBGE, 2019; IBGE, 2020; LIMA *et al.*, 2019).

Região Nordeste apresenta altas temperatura 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 o clima predominantemente tropical, com presença do clima semiárido que se

estende por todos os estados, com exceção do estado do Maranhão (ALVARES *et al.*, 2013).

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). Com o alto potencial solar do Nordeste, já há 83 empreendimentos fotovoltaicos em operação em sete estados (exceção para Sergipe e Alagoas), com uma potência outorgada de 2065,31 MW (ANEEL, 2020).

6.2.2. 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.*, 2017). Os modelos globais utilizados foram o Modelo Brasileiro do Sistema Terrestre (BESM) (BESM, 2021), o *Hadley Centre Global Environment Model versão 2 - Earth System* (HadGEM2-ES), o *Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis* (CanESM2) (MOHAN; BHASKARAN, 2019) (ANEXO I) e o modelo regional foi o Eta (RUFFATO-FERREIRA *et al.*, 2017).

O modelo BESM é aninhado ao modelo oceânico MOM4 (*Modular Ocean Model 4*) e seus processos da superfície terrestre são representados a partir do modelo SSIB (Modelo Simples da Biosfera) (CHOU *et al.*, 2014a). O BESM foi desenvolvido pelo INPE e está baseado na estrutura do modelo acoplado oceano-atmosfera do CPTEC (VEIGA *et al.*, 2019).

A segunda geração da família do HadGEM, o HadGEM2-ES, inclui componentes atmosféricos, de gelo marinho e oceano (MARTIN *et al.*, 2011). 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) (SOSPEDRALFONSO; MERRYFIELD, 2017).

Os procesos 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 radioativa seria de 4,5 W/m² e a concentração de CO₂ em 650 ppm se estabilizaria após 2100 (THOMSON *et al.*, 2011). No caso do RCP8.5, além de um alto crescimento populacional, a forçante radioativa alcançaria 8,5 W/m², e a concentração de CO₂ 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, em 3237 pontos da região Nordeste do Brasil, os quais encontram-se a uma distância de aproximadamente 22,3 km um do outro.

6.3. Resultados e discussão

6.3.1. 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 Figura 6.1.

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 de ambos os modelos, o aumento será mais intenso para as cidades localizadas no estado do Maranhão (Figura 6.1). 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 (Figura 6.1). No caso do estudo realizado por Oscar Junior *et al.* (2015) reduções na radiação solar foram projetados 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.

Resultados para outras regiões pelo mundo evidenciaram aumento da radiação até 2049, no entanto, reduções para o Noroeste da China e da Índia foram projetados por um conjunto de modelos do CMIP5 (WILD *et al.*, 2015).

Ao contrário do que ocorre com os modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2, onde 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 (Figura 6.1).

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).

Tal como as projeções geradas pelo modelo Eta-BESM, resultados de redução predominante da radiação solar foram observados por Ohunakin *et al.* (2015), na Nigéria, até o final do século XXI a partir do RegCM3 junto ao ECHAM5.

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 6.1).

Tabela 6.1: 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.

	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	-3,4	1,8	1,6	1,8	2,5	2,1

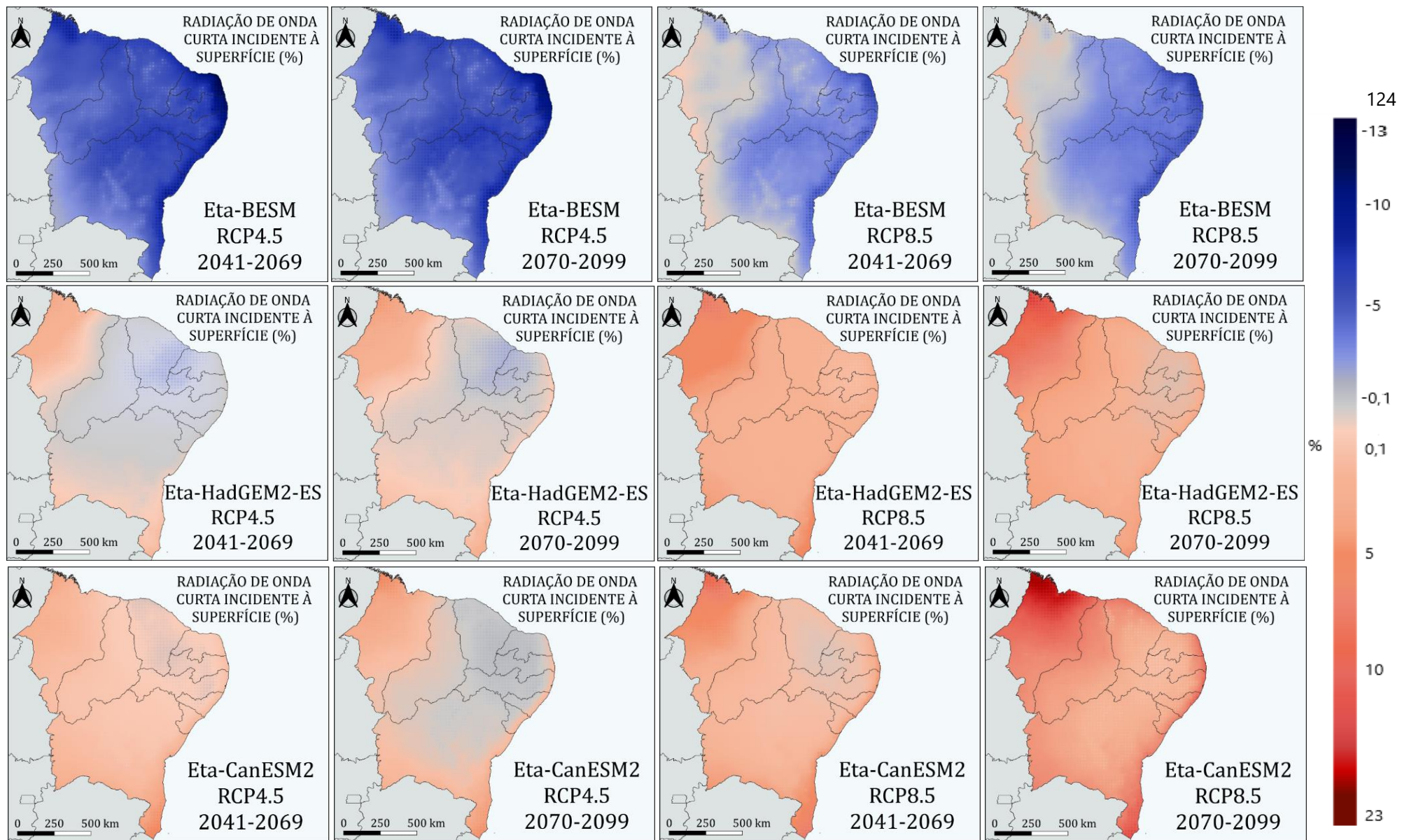


Figura 6.1: Anomalias projetadas para radiação de onda curta incidente à superfície nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 nos períodos de 2041-2069 e 2070-2099 para os modelos Eta-BESM, Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 na região Nordeste do Brasil.

6.3.2. 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 Figura 6.2. 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 nos dois cenários estudados, ocorrendo de forma mais intensa sob o RCP4.5 (Figura 6.2).

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. De acordo com Ohunakin *et al.* (2015) a nebulosidade está prevista para aumentar futuramente na Nigéria e acredita-se que ela seja a responsável pela diminuição da irradiação solar global.

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.

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 6.2.).

Tabela 6.2: 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

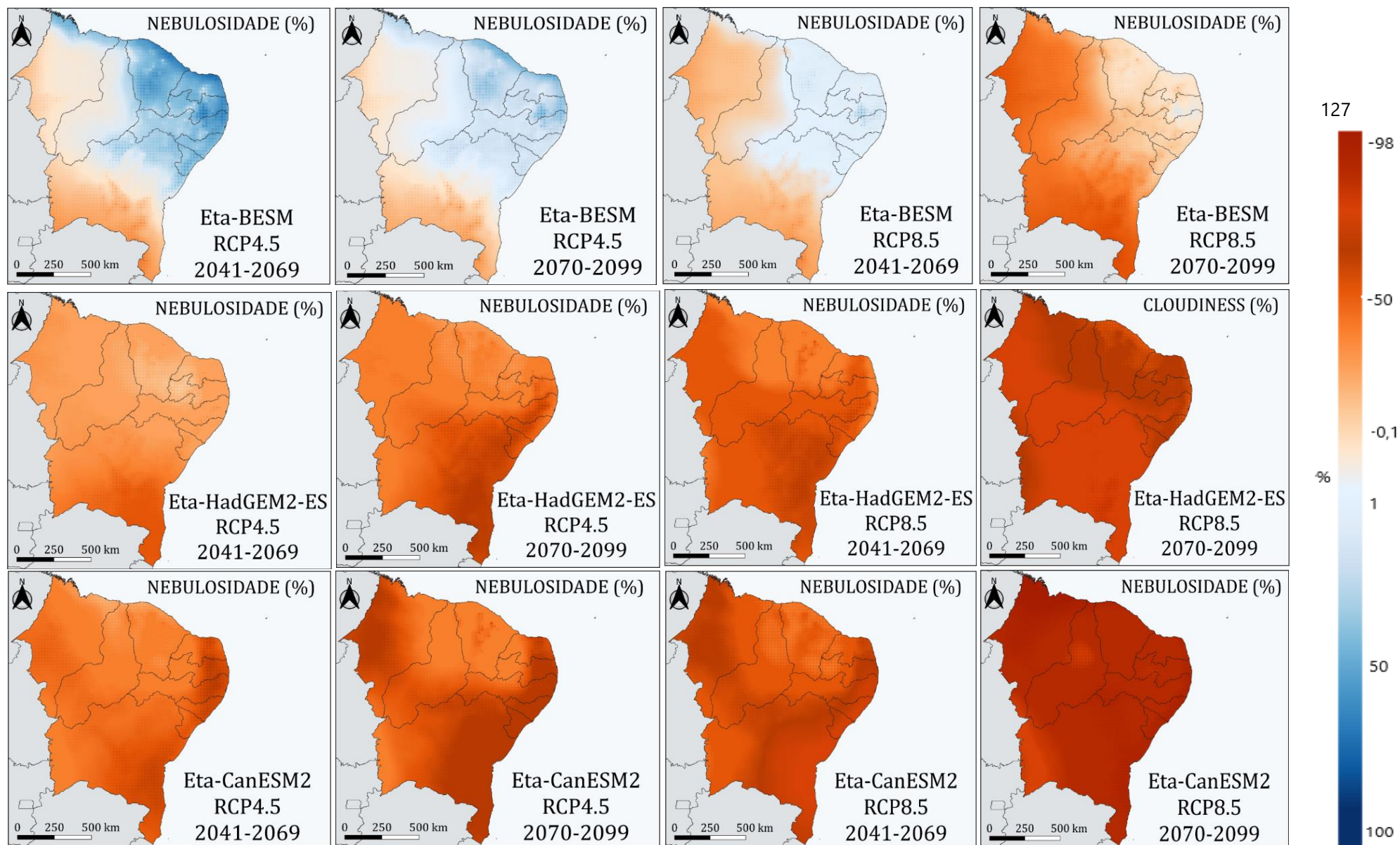


Figura 6.2: Anomalias projetadas para nebulosidade nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 nos períodos de 2041-2069 e 2070-2099 para os modelos Eta-BESM, Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 na região Nordeste do Brasil.

Como pode ser visto na Figura 6.3, 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.

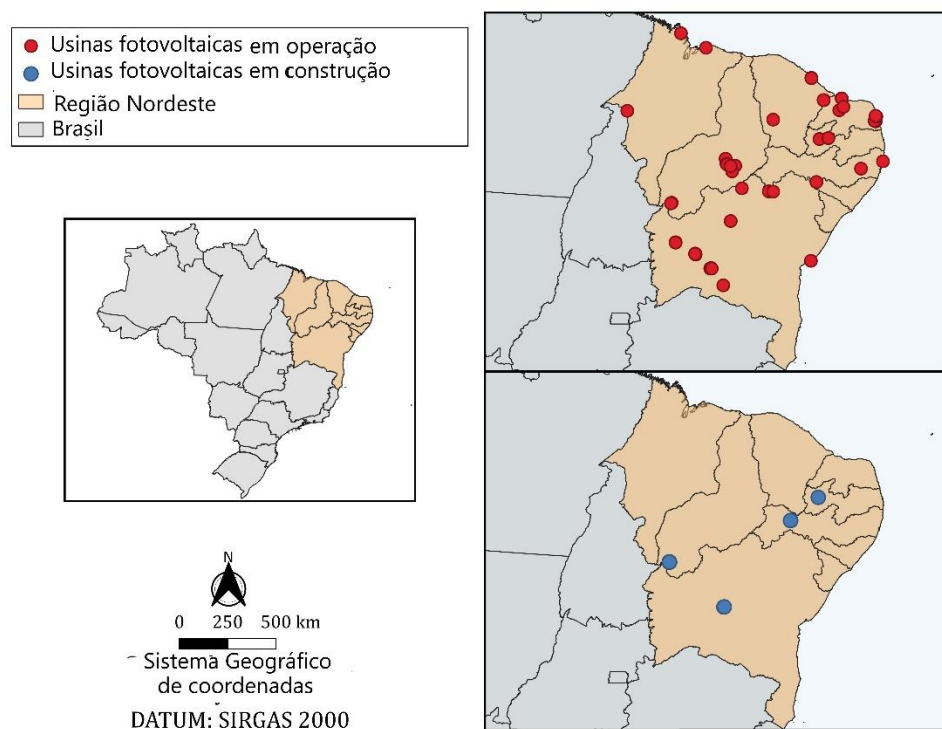


Figura 6.3: Usinas fotovoltaicas localizadas na Região Nordeste do Brasil. Adaptado de IBGE (2017); ANEEL (2020).

Seguindo as projeções do modelo Eta-BESM, 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. De acordo com Zhang *et al.* (2018) os recursos solares globais aumentarão durante o século XXI sob os cenários RCP2.6 e RCP8.5.

No estado do Maranhão há três usinas fotovoltaicas em operação, a que se encontra no município de Imperatriz (a oeste do estado do Maranhão) está localizada 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 (Figuras 6.1, 6.2 e 6.3). Em Ontário-Canadá, Wang *et al.* (2020) sugeriram que a geração solar poderá aumentar em 41% em 2050 e 52% em 2080

ambos sob o RCP4.5. No cenário RCP8.5, esse incremento será de 67% em 2050 e de 70% em 2080.

De acordo com Wang *et al.* (2020) afirmaram o desenvolvimento da energia solar em Ontário possivelmente se beneficiará das mudanças climáticas devido ao número reduzido de dias chuvosos e nublados. No presente estudo, as projeções a partir dos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 indicaram a possível redução da nebulosidade nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 e no cenário mais pessimista no modelo Eta-BESM para a região Nordeste (Figura 6.2).

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 (Figura 6.1, Figura 6.2 e Figura 6.3).

De acordo com De Jong *et al.* (2019) 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); Arei Branca (Rio Grande do Norte) e outros parques no Brasil os aumentos projetados da radiação foram estatisticamente significativos.

Por fim, os resultados para radiação solar incidente à superfície e a nebulosidade se apresentaram de forma inversamente proporcional. Os modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 projetaram resultados próximos, todavia, o modelo Eta-BESM vai de encontro com os dados dos outros modelos.

6.4. Conclusão

No presente estudo foram realizadas projeções para radiação solar incidente à superfície e nebulosidade para a região Nordeste do Brasil 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.

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. Assim como ocorre para a radiação solar incidente à superfície, na

nebulosidade o modelo Eta-BESM vai de encontro ao que foi projetado nos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2.

Observou-se que nos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2, nos quais são projetados aumentos na radiação, percebe-se a redução da nebulosidade. Enquanto o aumento da nebulosidade no Eta-BESM combina com a redução da radiação.

As projeções dos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 evidenciaram pequenas reduções na radiação 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 amplamente 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 solar. 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.

6.5. Referências

ANEEL. Atlas de Energia Elétrica do Brasil, 3ed; 2010. Disponível em: [www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar\(3\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar(3).pdf). Acesso em: 08/10/2020.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica, 2020. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/siga>. Acesso em: 02/10/2020.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. DE. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

BARTÓK, B.; WILD, M.; FOLINI, D.; LUTHI, D.; KOTLARSKI, S.; SCHAR, C.; VAUTARD, R.; JEREZ, S.; IMECS, Z. 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.

BESM. Brazilian Earth System Model. Disponível em: <http://www.inpe.br/BESM/>. Acesso em: 02/03/2021.

BRAZIL. **Third National Communication of Brazil to the United Nations Framework Convention on Climate Change – Executive Summary**. Ministry of Science, Technology and Innovation Secretariat of Policies and Programs of Research and Development General Coordination of Global Climate Change. Brasília, 2016.

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.

CANADA. CA. Environment and Climate Change Canada. Disponível em: <https://www.ec.gc.ca/ccmac-cccma/default.asp?lang=En&n=1A3B7DF1-1&wbdisable=true>. Acesso em: 27/02/2021.

COLLINS, W. J.; BELLOUIN, N.; DOUTRIAUX-BOUCHER, M.; GEDNEY, N.; HALLORAN, P.; HINTON, T.; HUGHES, J.; JONES, C. D.; JOSHI, M.; LIDDICOAT, S.; MARTIN, G.; O'CONNOR, F.; RAE, J.; SENIOR, C.; SITCH, S.; TOTTERDELL, I.; WILTSHIRE, A.; WOODWARD, S. Development and evaluation of an Earth-System model - HadGEM2. **Geoscientific Model Development**, v. 4, n. 4, p. 1051–1075, 2011.

COSTA, R. L.; BAPTISTA, G. M DE. M.; GOMES, H. B.; SILVA, F. D DOS. S.; ROCHA JÚNIOR, R.; L DA.; SALVADOR, M DE. A.; HERDIES, D. L. Analysis of climate extremes indices over northeast Brazil from 1961 to 2014. **Weather and Climate Extremes**, v. 28, 2020.

CHOU, S.C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DEREZYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.; BUSTAMANTE, J.; TAVARES, P.; SILVA, A.; RODRIGUES, D.; CAMOS, D.; CHAGAS, D.; SUEIRO, G.; SIQUEIRA, G.; NOBRE, P.; MARENGO, J. Evaluation of the Eta Simulations Nested in Three Global Climate Models. **American Journal of Climate Change**, 3, 438-454, 2014a. Disponível em: http://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx?PaperID=52887#.VakHg_IViko. Acesso em: 07/08/2020.

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**, 3, 512-527, 2014b. Disponível em: http://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx?PaperID=52877#.VakIh_IVikp. Acesso em: 07/08/2020.

DE JONG, P.; BARRETO, T. B.; TANAJURA, C. A. S.; KOULOUKOUI, D.; ESQUERRE-OLIVEIRA, K. P.; KIPERSTOK, A.; TORRES, E. A. 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.

EK, M.; MITCHELL, K.E.; LIN, Y.; ROGERS, E.; GRUNMANN, P.; KOREN, V.; GAYNO, G; TARPLEY, J.D. 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.

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 DE., TONEZER, C.; SANTOS, G. R DOS.; COIMBRA-ARAÚJO, C. H. Economic overview of the use and production of photovoltaic solar energy in brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, n. April 2016, p. 181–191, 2018.

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, p. 101-111, 2003.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2017. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>. Acesso em: 31/08/2020.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cidades e Estados, 2019. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados.html?>. Acesso em: 16/09/2020.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cidades e Estados, 2020. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados.html?view=municipio>. Acesso em: 16/09/2020.

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.; BRANDLI, L.; CAEIRO, S. S.; DISTERHEFT, A. 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.

LIMA, F. J. L DE.; MARTINS, F. R.; COSTA, R. S.; GONÇALVES, A. R.; SANTOS, A. P. P DOS.; PEREIRA, E. B. The seasonal variability and trends for the surface solar irradiation in northeastern region of Brazil. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 35, n. August, p. 335–346, 2019.

LIANG, S.; WANG, K.; ZHANG, X.; WILD, M. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, V. 3, p. 225-240, 2010.

LYRA, A.; TAVARES, P.; CHOU, S. C.; SUEIRO, G.; DERECZYNSKI, C.; SONDERMANN, M.; SILVA, A.; MARENGO, J.; GIAROLLA, A. Climate change projections over three metropolitan regions in Southeast Brazil using the non-hydrostatic Eta regional climate model at 5-km resolution *Theor Appl Climatol*. 2017. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00704-017-2067-z>. Acesso em: 29/07/2020.

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.

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.

MARTIN, G. M.; BELLOUIN, N.; COLLINS, W. J.; CULVERWELL, I. D.; HALLORAN, P. R.; HARDIMAN, S.C.; HINTON, T. J.; JONES, C. D.; MCDONALD, R.E.; MCLAREN, A. J.; O’CONNOR, F. M.; ROBERTS, M. J.; RODRIGUEZ, J. M.; WOODWARD, S.; BEST, M. J.; BROOKS, M. E.; BROWN, A.; R.; BUTCHART, N.; DEARDEN, C.; DERBYSHIRE, S. H.; Dharssi, I.; DOUTRIAUX-BOUCHER, M.; EDWARDS, J. M.; FALLOON, P. D.; GEDNEY, N.; GRAY, L. J.; HEWITT, H. T.; HOBSON, M.; HUDDLESTON, M. R.; HUGHES, J.; INESON, S.; INGRAM, W. J.; JAMES, P. M.; JOHNS, T. C.; JOHNSON, C. E.; JONES, A.; JONES, C. P.; JOSHI, M. M.; KEEN, A. B.; LIDDICOAT, S.; LOCK, A. P.; MAIDENS, A. V.; MANNERS, J. C.; MILTON, S. F.; RAE, J. G.L.; RIDLEY, J. K.; SELLAR, A.; SENIOR, C. A.; TOTTERDELL, I. J.; VERHOEF, A.; VIDALE, P. L., WILTSHIRE, A. The HadGEM2 family of Met Office Unified Model climate configurations. **Geoscientific Model Development**, v. 4, n. 3, p. 723–757, 2011.

MOHAJERI, N.; PERERA, A. T. D.; COCCOLO, S.; MOSCA, L.; LE GUEN, M.; SCARTEZZINI, J. 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.

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.

NYASIMI, M. Review of Targets for the Sustainable Development Goals: The Science Perspective. **Journal of Education for Sustainable Development**, v. 9, n. 2, p. 237–237, 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.

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. 06, n. 08, p. 221–232, 2015.

PRUDHOMME, C.; GIUNTOLI, I.; ROBINSON, E. L.; CLARK, D. B.; ARNELL, N. W.; DANKERS, R.; FEKETE, B. M.; FRANSSSEN, W.; GERTEN, D.; GOSLING, S. N.; HAGEMANN, S.; HANNAH, D. M.; KIM, H.; MASAKI, Y.; SATOH, Y.; STACKE, T.; WADA, Y.; WISSER, D. 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, 2014.

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.

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.

QUEIROZ, A. R DE.; LIMA, L. M. M.; LIMA, J. W. M.; SILVA, B. C DE.; 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.

RAVESTAIN, P.; SCHRIER, V. D.; HAARSMA, 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, n. October 2017, p. 497–508, 2018.

RIAHI, K.; RAO, S.; KREY, V.; CHO, C.; CHIRKOV, V.; FISCHER, G.; KINDERMANN, G.; NAKICENOVIC, N.; RAFAJ, P. RCP 8.5-A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. **Climatic Change**, v. 109, n. 1, p. 33–57, 2011.

RUFFATO-FERREIRA, V.; BARRETO, R DA. C.; OSCAR JÚNIOR, A.; SILVA, L. W.; VIANA, D DE. B.; NASCIMENTO, J. A S DO.; FREITAS, M. A. V DE. 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, n. October 2015, p. 1124–1137, 2017.

SANTOS, J. B.; VILLÁN, D. M.; CASTRILLO, A DE. M. Analysis and Cloudiness Influence on UV Total Irradiation. **International Journal of Climatology**, v. 31, p. 451-460, 2011.

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, n. 2015, p. 68–80, 2015.

SANTOS, F.; GÓMEZ-GESTEIRA, M.; CASTRO, M DE.; AÑEL, J. A.; CARVALHO, D.; COSTOYA, X.; DIAS, J.M. 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.

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.

TAO, H.; EWEEES, A. A. E.; AL-SULTTANI, A. O.; BEYAZTAS, U.; HAMEED, M.

M.; SALIH, S.; ARMANUOS, A. M.; AL-ANSARI, N.; VOYANT, C.; SHARID, S.; YASSEN, Z. M. Global solar radiation prediction over North Dakota using air temperature: Development of novel hybrid intelligence model. **Energy Reports**, v. 7, p. 136-157, 2021.

THOMSON, A. M.; CALVIN, K. V.; SMITH, S. J.; KYLE, G. P.; VOLKE, A.; PATEL, P.; DELGADO-ARIAS, S.; WISE, M. A.; CLARKE, L. E.; EDMONDS, J. A. RCP4.5: A pathway for stabilization of radiative forcing by 2100. **Climatic Change**, v. 109, n. 1, p. 77–94, 2011.

VEIGA, S. F.; NOBRE, P.; GIAROLLA, E.; CAPISTRANO, V.; BAPTISTA, M.; MARQUEZ, A. L.; NILO, F. S.; BONATTI, J. P.; KUBOTA, P.; NOBRE, C. A. 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.

WACHSMUTH, J.; BLOHM, A.; GÖBLING-REISEMANN, s.; EICKEMEIER, T.; GASPER, R.; STÜHRMANN, S. 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.

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.

WANG, S.; ZHU, J.; HUANG, G.; BAETZ, B.; CHENG, G.; ZENG, X.; WANG, X. Assessment of climate change impacts on energy capacity planning in Ontario, Canada using high-resolution regional climate model. **Journal of Cleaner Production**, v. 274, p. 123026, 2020.

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.

WILD, M. *et al.* Projections of long-term changes in solar radiation based on CMIP5 climate models and their influence on energy yields of photovoltaic systems. **Solar Energy**, v. 116, p. 12–24, 2015.

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.

ZHANG, X.; LIANG, S.; WANG, G.; YAO, Y.; JIANG, B.; CHENG, J. 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, 2016.

ZHANG, F.; WANG, C.; XIE, G.; KONG, W.; JIN, S.; HU, J.; CHEN, X. Projection of global wind and solar resources over land in the 21st century. **Global Energy**

Interconnection, v. 1, n. 4, p. 443–451, 2018.

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.

CAPÍTULO 7

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os estudos realizados e já publicados a respeito da influência das mudanças climáticas nas energias renováveis indicaram que a modificação climática poderá gerar a necessidade de algumas áreas se adaptarem para a produção energética futura. Além disso, é notório que a utilização de um maior número de modelos climáticos globais e regionais garantem uma maior confiabilidade nos dados projetados.

Para a região Nordeste do Brasil, a utilização de um conjunto de modelos climáticos projetou o aumento da temperatura do ar futura. Todavia, observou-se que o modelo Eta-BESM apresentou as temperaturas mais altas sob o RCP4.5 em 2041-2069. Os maiores resultados para temperatura foram observados para o período futuro 2070-2099 nos três modelos climáticos utilizados sob o cenário RCP8.5.

No caso da umidade relativa do ar observou-se uma grande variabilidade nos resultados. Ainda assim a redução é predominante na região Nordeste, alcançando os maiores valores sob o cenário RCP8.5 em 2070-2099.

A precipitação projetada também apresentou variabilidade entre os modelos, ainda assim, a redução é predominante nos modelos Eta-HadGEM2-ES, Eta-CanESM2 e Eta-MIROC5. Por sua vez, os dados projetados pelo Eta-BESM indicaram um aumento extremo da precipitação para todo o Nordeste do Brasil, com resultados completamente distintos dos observados nos outros modelos empregados.

Os resultados encontrados para a velocidade do vento a 10 m e a 100 m evidenciaram o aumento predominante em toda região Nordeste. Por sua vez, em algumas localidades foram projetadas possíveis reduções, principalmente nos estados do Rio Grande do Norte e da Paraíba.

Em áreas onde encontram-se parques eólicos em operação e em construção os dados sugeriram possíveis reduções na velocidade dos ventos a 100 m nos estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco e Sergipe sob o RCP8.5 no modelo Eta-BESM e sob o RCP4.5 no modelo Eta-HadGEM2-ES.

Os resultados projetados para a radiação solar de onda curta incidente à superfície evidenciaram o aumento predominante a partir do Eta-HadGEM2-ES e do

Eta-CanESM2. Por sua vez, os resultados observados no modelo Eta-BESM mostraram uma possível redução da radiação para o Nordeste.

Os dados projetados pela maioria dos modelos sugeriram que a nebulosidade irá diminuir em toda região Nordeste, com exceção do modelo Eta-BESM, no qual as projeções apontaram o aumento da nebulosidade, principalmente sob o RCP4.5.

Da mesma forma que na radiação, os resultados projetados pelo modelo Eta-BESM para a nebulosidade contrastam com os dos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2. Enquanto estes projetaram o possível aumento para todo o Nordeste, aquele projetou uma redução.

Neste estudo, dos modelos climáticos empregados o Eta-BESM gerou os resultados mais distintos, indo de encontro com os dados de todos os outros modelos aplicados. Além disso, o modelo Eta-BESM projetou diminuição da temperatura máxima do ar no cenário mais otimista, resultados extremos para a precipitação nos dois cenários aplicados e resultados contrários aos dos outros modelos para a radiação e a nebulosidade (Tabela 7.1).

Tabela 7.1: Resumo dos resultados predominantes nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 a partir dos modelos empregados para os parâmetros avaliados na região Nordeste do Brasil.

Parâmetros	Modelos Climáticos							
	Eta-BESM		Eta-HadGEM2-ES		Eta-CanESM2		Eta-MIROC5	
	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
Temperatura média, mínima e máxima do ar	↑	↑	↑	↑	↑	↑		
Umidade relativa do ar	↑	↓	↓	↓	↓	↓		
Precipitação	↑	↑	↓	↓	↓	↓	↓	↓
Velocidade dos ventos a 10 m e a 100 m	↑	↑	↑	↑	↑	↑		
Radiação de onda curta incidente à superfície	↓	↓	↓	↑	↑	↑		
Nebulosidade	↑	↓	↓	↓	↓	↓		

↑: aumento ↓: redução

Os dados analisados evidenciaram que a região Nordeste poderá sofrer com um cenário mais árido e quente devido ao aumento das temperaturas associado à redução da umidade relativa do ar e da precipitação. Além disso, a região poderá ser uma área propícia para o aumento da produção energética renovável a partir das fontes solar e eólica.

Os resultados permitem uma visão futura a respeito dos parâmetros avaliados e, com isso, a oportunidade de se realizar um planejamento energético que leve em consideração o aumento potencial para a produção de energia solar e eólica.

Em suma, o emprego de diferentes modelos climáticos contribuiu para uma visão mais ampla e confiável dos resultados conferindo uma oportunidade de tornar a discussão mais diversificada. Além disso, a partir das projeções de distintos modelos climáticos observou-se como cada modelo se comportou no momento de projetar os parâmetros climáticos analisados para a região Nordeste do Brasil.

REFERÊNCIAS DE TODA DISSERTAÇÃO

ABEEOLICA - Associação Brasileira de Energia Eólica. Annual Wind Energy Reported 2019. Disponível em: http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2020/07/EN_Boletim-Anual-de-Gera%C3%A7%C3%A3o-2019.pdf. Acesso em: 07/08/2020.

AHMAD, I.; AHMAD, B.; BOOTE, K.; HOOGENBOOM, G. Adaptation strategies for maize production under climate change for semi-arid environments. **European Journal of Agronomy**, v. 115, n. June 2019, p. 126040, 2020.

ALMAGRO, A.; OLIVEIRA, P. T. S.; ROSOLEM, R.; HAGEMANN, S.; NOBRE, C. A. Performance evaluation of Eta/HadGEM2-ES and Eta/MIROC5 precipitation simulations over Brazil. **Atmospheric Research**, v. 244, n. May, p. 105053, 2020.

ALMAZROUI, M. *et al.* Assessing the robustness and uncertainties of projected changes in temperature and precipitation in AR5 Global Climate Models over the Arabian Peninsula. **Atmospheric Research**, v. 194, n. May, p. 202–213, 2017.

ALTHOFF, T. D.; MENEZES, R. S. C.; CARVALHO, A. L DE.; PINTO, A DE. S.; SANTIAGO, G. A. C. F.; OMETTO, J. P. H. B.; RANDOW, C. V.; SAMPAIO, E. V DE. S. B. Climate change impacts on the sustainability of the firewood harvest and vegetation and soil carbon stocks in a tropical dry forest in Santa Teresinha Municipality, Northeast Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 360, p. 367–375, 2016.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L DE. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

ANEEL. Atlas de Energia Elétrica do Brasil, 3ed; 2008. Disponível em: https://www.aneel.gov.br/documents/656835/14876406/2008_AtlasEnergiaEletricaBrasil3ed/297ceb2e-16b7-514d-5f19-16cef60679fb. Acesso em: 08/10/2020.

ANEEL. Atlas de Energia Elétrica do Brasil, 3ed; 2010. Disponível em: [www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-EnergiaSolar\(3\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-EnergiaSolar(3).pdf). Acesso em: 08/10/2020.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica, 2020. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/signa>. Acesso em: 02/10/2020.

ANGELES, M. E.; GONZALEZ, J. E.; ERICKSON III, D.; HERNÁNDEZ, J. L. The Impacts of Climate Changes on the Renewable Energy Resources in the Caribbean. **Journal of Solar Energy Engineering-Transactions of The Asme**, v. 132, p. 1–13, 2010.

BARSTAD, I.; SOTERBERG, A.; MESQUITA, M. S. Present and future offshore wind power potential in northern Europe based on downscaled global climate runs with adjusted SST and sea ice cover. **Renewable Energy**, v. 44, p. 398–405, 2012.

BARTÓK, B.; WILD, M.; FOLINI, D.; LÜTHI, D.; KOTLARSKI, S.; SCHÄR, C.; VAUTARD, R.; JEREZ, S.; IMECS, Z. 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.

BENDER, F. D.; SENTELHAS, P. C. Solar radiation models and gridded databases to fill gaps in weather series and to project climate change in Brazil. **Advances in Meteorology**, v. 2018, p. 1-15, 2018.

BESM. Brazilian Earth System Model. Disponível em: <http://www.inpe.br/BESM/>. Acesso em: 02/03/2021.

BRAZIL. **Third National Communication of Brazil to the United Nations Framework Convention on Climate Change – Executive Summary**. Ministry of Science, Technology and Innovation Secretariat of Policies and Programs of Research and Development General Coordination of Global Climate Change. Brasília, 2016.

BRONSTERT, A.; GUNTNER, A.; ARAUJO, J. C DE.; JAEGER, A. Possible climate change impacts on water resources availability in a large semiarid catchment in Northeast Brazil. **IAHS-AISH Publication**, n. 295, p. 221–230, 2005.

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.

CAPISTRANO, V. B.; NOBRE, P.; TEDESHI, R. G.; SILVA, J. Overview of climate change in the BESM-OA2.5 climate model. **Geoscientific Model Development Discussions**, p. 1–29, 2018.

CARBON BRIEF. Clear on Climate. Q&A: How do climate models work? Disponível em: <https://www.carbonbrief.org/qa-how-do-climate-models-work> Acesso em: 01/03/2018.

CARVALHO, A. L DE.; MENEZES, R. S. C.; NÓBREGA, R. S.; PINTO, A DE. S.; OMETTO, J. P H. B.; RANDOW, C. V.; GIAROLLA, A. Impact of climate changes on potential sugarcane yield in Pernambuco, northeastern region of Brazil. **Renewable Energy**, v. 78, p. 26–34, 2015.

CARVALHO, D.; ROCHA, A.; GÓMEZ-GESTEIRA, M.; SANTOS, C. S. Potential impacts of climate change on European wind energy resource under the CMIP5 future climate projections. **Renewable Energy**, v. 101, p. 29-40, 2017.

CAVALCANTE JUNIOR, E. G.; MEDEIROS, J. F DE.; SOBRINHO, J. E.; FIGUEIRÊDO, V. B.; COSTA, J. P. N DA.; SANTOS, W DE. O. Development and water requirements of cowpea under climate change conditions in the Brazilian semi-arid region. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, n. 9, p. 783–788, 2016.

CHANG, T. J.; CHEN, C. L.; TU, Y.; YEH, H.; WU, Y. Evaluation of the climate

change impact on wind resources in Taiwan Strait. **Energy Conversion and Management**, v. 95, p. 435–445, 2015.

CHEN, L. Impacts of climate change on wind resources over North America based on NA-CORDEX. **Renewable Energy**, v. 153, p. 1428-1438, 2020.

CHOU, S. C.; MARENGO, J. A.; LYRA, A. A.; SUEIRO, G.; PESQUERO, J. F.; ALVES, L. M.; KAY, G.; BETTS, R.; CHAGAS, D. J.; GOMES, J. L.; BUSTAMANTE, J. F.; TAVARES, P. Downscaling of South America present climate driven by 4-member HadCM3 runs. **Climate Dynamics**, v. 38, n. 3–4, p. 635–653, 2012.

CHOU, S.C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DERECZYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.; BUSTAMANTE, J.; TAVARES, P.; SILVA, A.; RODRIGUES, D.; CAMOS, D.; CHAGAS, D.; SUEIRO, G.; SIQUEIRA, G.; NOBRE, P.; MARENGO, J. Evaluation of the Eta Simulations Nested in Three Global Climate Models. **American Journal of Climate Change**, 3, 438-454, 2014a. Disponível em: http://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx?PaperID=52887#.VakHg_IViko. Acesso em: 27/08/2020.

CHOU, S.C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DERECZYNSKI, C. Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. **American Journal of Climate Change**, 3, 512-527, 2014b. Disponível em: http://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx?PaperID=52877#.VakIh_IVikp. Acesso em: 27/08/2020.

COLLINS, W. J.; BELLOUIN, N.; DOUTRIAUX-BOUCHER, M.; GEDNEY, N.; HALLORAN, P.; HINTON, T.; HUGHES, J.; JONES, C. D.; JOSHI, M.; LIDDICOAT, S.; MARTIN, G.; O'CONNOR, F.; RAE, J.; SENIOR, C.; SITCH, S.; TOTTERDELL, I.; WILTSHIRE, A.; WOODWARD, S. Development and evaluation of an Earth-System model - HadGEM2. **Geoscientific Model Development**, v. 4, n. 4, p. 1051–1075, 2011.

COSTA, R. L.; BAPTISTA, G. M DE. M.; GOMES, H. B.; SILVA, F. D DOS. S.; ROCHA JÚNIOR, R.; L DA.; SALVADOR, M DE. A.; HERDIES, D. L. Analysis of climate extremes indices over northeast Brazil from 1961 to 2014. **Weather and Climate Extremes**, v. 28, 2020.

COSTOYA, X.; CASTRO, M DE.; SANTOS, F.; SOUSA, M. C.; GÓMEZ-GESTEIRA, M. Projections of wind energy resources in the Caribbean for the 21st century. **Energy**, v. 178, p. 356–367, 2019.

COSTOYA, X.; CASTRO, M DE.; CARVALHO, D.; GÓMEZ-GESTEIRA, M. On the suitability of offshore wind energy resource in the United States of America for the 21st century. **Applied Energy**, v. 262, n. January, 2020.

DAVY, R.; GNATIUK, N.; PETTERSON, L.; BOBYLEV, L. Climate change impacts on wind energy potential in the European domain with a focus on the Black Sea. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, n. January 2017, p. 1652–1659,

2018.

DE JONG, P.; DARGAVILLE, R.; SILVER, J.; UTEMBE, S.; KIPERSTOK, A.; TORRES, A. T. Forecasting high proportions of wind energy supplying the Brazilian Northeast power system. **Applied Energy**, v. 195, p. 538–555, 2017.

DE JONG, P.; BARRETO, T. B.; TANAJURA, C. A. S.; KOULOUKOUI, D.; ESQUERRE-OLIVEIRA, K. P.; KIPERSTOK, A.; TORRES, E. A. 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.

EICHELBERGER, S.; MCCA, J.; NIJESSEN, B.; WOOD, A. W. Climate Change Effects on Wind Speed. **North American Windpower**, n. January, p. 4, 2008.

EK, M.; MITCHELL, K.E.; LIN, Y.; ROGERS, E.; GRUNMANN, P.; KOREN, V.; GAYNO, G.; TARPLEY, J.D. 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.

FANT, C.; SCHLOSSER, C. A.; STRZEPEK, K. The impact of climate change on wind power production in southern Africa. **Applied Energy**, v. 1, p. 556–564, 2016.

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 DE., TONEZER, C.; SANTOS, G. R DOS.; COIMBRA-ARAÚJO, C. H. Economic overview of the use and production of photovoltaic solar energy in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, n. April 2016, p. 181–191, 2018.

Flato, G., J. Marotzke, B. Abiodun, P. Braconnot, S.C. Chou, W. Collins, P. Cox, F. Driouech, S. Emori, V. Eyring, C. Forest, P. Gleckler, E. Guilyardi, C. Jakob, V. Kattsov, C. Reason and M. Rummukainen, 2013: Evaluation of Climate Models. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

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, p. 101-111, 2003.

GAO, X.; GIORGI, F. Increased aridity in the Mediterranean region under greenhouse gas forcing estimated from high resolution simulations with a regional climate model. **Global and Planetary Change**, v. 62, n. 3–4, p. 195–209, 2008.

GAO, Y.; MA, S.; WANG, T. The impact of climate change on wind power abundance

and variability in China. **Energy**, v. 189, 2019.

GONÇALVES-AGEITOS, M.; BARRERA-ESCODA, A.; BALDASANO, J. M.; CUNILLERA, J. Modelling wind resources in climate change scenarios in complex terrains. **Renewable Energy**, v. 76, p. 670–678, 2015.

GONDIM, R. S.; CASTRO, M. A. H DE.; MAIA, A DE. H. N.; EVANGELISTA, S. R. M.; FUCK, S DE. F. Climate Change Impacts on Irrigation Water Needs in the jaguaribe River Basin. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 48, n. 2, p. 355–365, 2012.

GONZÁLEZ, A.; PÉREZ, J. C.; DÍAZ, J. P.; EXPÓSITO, F. J. Future projections of wind resource in a mountainous archipelago, Canary Islands. **Renewable Energy**, v. 104, p. 120–128, 2017.

GUNDERSON, I.; GOYETTE, S.; GAGO-SILVA, A.; QUIQUEREZ, L.; LEHMANN, A. Climate and land-use change impacts on potential solar photovoltaic power generation in the Black Sea region. **Environmental Science and Policy**, v. 46, p. 70–81, 2015.

GUO, J. HUANG, G.; WANG, X.; XU, Y.; LI, Y. Projected changes in wind speed and its energy potential in China using a high-resolution regional climate model. **Wind Energy**, n. May 2019, p. 471–485, 2019.

HDIDOUAN, D.; STAFFELL, I. The impact of climate change on the levelised cost of wind energy. **Renewable Energy**, v. 101, n. June, p. 575–592, 2017.

HERRERA-PANTOJA, M.; HISCOCK, K. M. Projected impacts of climate change on water availability indicators in a semi-arid region of central Mexico. **Environmental Science and Policy**, v. 54, p. 81–89, 2015.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2017. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>. Acesso em: 31/08/2020.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cidades e Estados, 2019. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados.html?view=municipio>. Acesso em: 22/06/2020.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cidades e Estados, 2020. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados.html?view=municipio>. Acesso em: 16/09/2020.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Cambridge University Press; 2014.

JACOB, D.; PETERSEN, J.; EGGERT, B.; ALIAS, A.; CHRISTENSEN, O. B.; BOUWER, L. M.; BRAUN, A.; COLETTE, A.; DÉQUÉ, M.; GEORGIEVSKI, G.; GEORGIOPOLOU, E.; GOBIET, A.; MENUT, L.; NIKULIN, G.; HAENSLER, A.;

HEMPELMANN, N.; JONES, C.; KEULER, K.; KOVATS, S.; KRÖNER, N.; KOTLARSKI, S.; KRIEGSMANN, A.; MARTIN, E.; MEIJGAARD, E. V.; MOSELEY, C.; PFEIFER, S.; PREUSCHMANN, S.; RADERMACHER, C.; RADTKE, K.; RECHID, D.; ROUNSEVELL, M.; SAMUELSSON, SOMOT, S.; SOUSSANA, J.; TEICHMANN, C.; VALENTINI, R.; VAUTARD, R.; WEBER, B.; YIOU, P. EURO-CORDEX: New high-resolution climate change projections for European impact research. **Regional Environmental Change**, v. 14, n. 2, p. 563–578, 2014.

JIA, G., SHEVLIAKOVA, E.; ARTAXO, P.; NOBLET-DUCOUDRÉ, N. De.; HOUGHTON, R.; HOUSE, J.; KITAJIMA, K.; LENNARD, C.; POPP A.; SIRIN, A.; SUKUMAR, R.; VERCHOT, L. 2019: Land–climate interactions. In: *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems* [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)]. In press.

JOHNSON, D. L.; ERHARDT, R. J. Projected impacts of climate change on wind energy density in the United States. **Renewable Energy**, v. 85, 2016.

KATOPODIS, T.; MARKANTONIS, I.; POLITI, N.; VLACHOGIANNIS, D.; SFETSOS, A. High-resolution solar climate atlas for greece under climate change using the weather research and forecasting (WRF) model. **Atmosphere**, v. 11, n. 7, p. 1–17, 2020.

KOLETSIS, I.; KOTRONI, V.; LAGOUVARDOS, K.; SOUKISSIAN, T. Assessment of offshore wind speed and power potential over the Mediterranean and the Black Seas under future climate changes. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 60, p. 234–245, 2016.

KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 15, n. 3, p. 259–263, 2006.

KROL, M. S.; BRONSTERT, A. Regional integrated modelling of climate change impacts on natural resources and resource usage in semi-arid Northeast Brazil. **Environmental Modelling and Software**, v. 22, n. 2, p. 259–268, 2007.

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.; BRANDLI, L.; CAEIRO, S. S.; DISTERHEFT, A. 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.

LIANG, S.; WANG, K.; ZHANG, X.; WILD, M. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, V. 3, p. 225-240, 2010.

LIMA, F. J. L DE.; MARTINS, F. R.; COSTA, R. S.; GONÇALVES, A. R.; SANTOS, A. P. P DOS.; PEREIRA, E. B. The seasonal variability and trends for the surface solar irradiation in northeastern region of Brazil. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 35, n. August, p. 335–346, 2019.

LIZUMA, L.; AVOTNIECE, Z.; RUPAINIS, S.; TEILANS, A. Assessment of the Present and Future Offshore Wind Power Potential: A Case Study in a Target Territory of the Baltic Sea Near the Latvian Coast. **The Scientific World Journal**, v. 2013, p. 1–10, 2013.

LUCENA, A. F. P DE.; SZKLO, A.; SCHAEFFER, R.; SOUZA, R. R DE. The vulnerability of renewable energy to climate change in Brazil. **Energy Policy**, v. 37, n. 3, p. 879–889, 2009.

LUCENA, A. F. P DE, SCHAEFFER, R.; SZKLO, A. S. Least-cost adaptation options for global climate change impacts on the Brazilian electric power system. **Global Environmental Change**, v. 20, n. 2, p. 342–350, 2010.

LUCENA, A. F. P DE, SCHAEFFER, R.; SZKLO, A. S.; DUTRA, R. M. The vulnerability of renewable energy to climate change in Brazil. **Renewable Energy**, v. 35, n. 5, p. 904–912, 2010.

LYRA, A.; TAVARES, P.; CHOU, S. C.; SUEIRO, G.; DEREZYNSKI, C.; SONDERMANN, M.; SILVA, A.; MARENGO, J.; GIAROLLA, A. Climate change projections over three metropolitan regions in Southeast Brazil using the non-hydrostatic Eta regional climate model at 5-km resolution *Theor Appl Climatol*. 2017. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00704-017-2067-z>. Acesso em: 29/07/2020.

MARENGO, J. A.; JONES, R.; ALVES, L. M.; VALVERDE, M. C. Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system. **International Journal of Climatology**, v. 29, n. March 2008, p. 2241–2255, 2009.

MARENGO, J. A.; CHOU, S. C.; KAY, G.; ALVES, L. M.; PESQUERO, J. F.; SOARES, W. R.; SANTOS, D. C.; LYRA, A. A.; SUEIRO, G.; BETTS, R.; CHAGAS, D. J.; GOMES, L. L.; BUSTAMANTE, J. F.; TAVARES, P. Development of regional future climate change scenarios in South America using the Eta CPTec/HadCM3 climate change projections: Climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Paraná River basins. **Climate Dynamics**, v. 38, n. 9–10, p. 1829–1848, 2012.

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.

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.

MARTIN, G. M.; BELLOUIN, N.; COLLINS, W. J.; CULVERWELL, I. D.; HALLORAN, P. R.; HARDIMAN, S.C.; HINTON, T. J.; JONES, C. D.; MCDONALD, R.E; MCLAREN, A. J.; O'CONNOR, F. M.; ROBERTS, M. J.; RODRIGUEZ, J. M.; WOODWARD, S.; BEST, M. J.; BROOKS, M. E.; BROWN, A.; R.; BUTCHART, N.; DEARDEN, C.; DERBYSHIRE, S. H.; Dharssi, I.; DOUTRIAUX-BOUCHER, M.; EDWARDS, J. M.; FALLOON, P. D.; GEDNEY, N.; GRAY, L. J.; HEWITT, H. T.; HOBSON, M.; HUDDLESTON, M. R.; HUGHES, J.; INESON, S.; INGRAM, W. J.; JAMES, P. M.; JOHNS, T. C.; JOHNSON, C. E.; JONES, A.; JONES, C. P.; JOSHI, M. M.; KEEN, A. B.; LIDDICOAT, S.; LOCK, A. P.; MAIDENS, A. V.; MANNERS, J. C.; MILTON, S. F.; RAE, J. G.L.; RIDLEY, J. K.; SELLAR, A.; SENIOR, C. A.; TOTTERDELL, I. J.; VERHOEF, A.; VIDALE, P. L., WILTSHIRE, A. The HadGEM2 family of Met Office Unified Model climate configurations. **Geoscientific Model Development**, v. 4, n. 3, p. 723–757, 2011.

MATTHEW, O. J.; OHUNAKIN, O. S. Simulating the effects of climate change and afforestation on wind power potential in Nigeria. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 22, p. 41–54, 2017.

MOEMKEN, J.; REYES, M.; FELDMANN, H.; PINTO, J. G. Future Changes of Wind Speed and Wind Energy Potentials in EURO-CORDEX Ensemble Simulations. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 123, n. 12, p. 6373–6389, 2018.

MEDEIROS, S. E. L.; NILO, P. F.; SILVA, L. P.; SANTOS, C. A. C.; CARVALHO, M.; ABRAHÃO, R. Influence of climatic variability on the electricity generation potential by renewable sources in the Brazilian semi-arid region. **Journal of Arid Environments**, v. 184, 2021.

MOHAJERI, N.; PERERA, A. T. D.; COCCOLO, S.; MOSCA, L.; LE GUEN, M.; SCARTEZZINI, J. 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.

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.

MONFORTI, F.; GAETANI, M.; VIGNATI, E. How synchronous is wind energy production among European countries? **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 59, p. 1622–1638, 2016.

MOURSI, H.; GAETANI, M.; VIGNATI, E. A probabilistic assessment of agricultural water scarcity in a semi-arid and snowmelt-dominated river basin under climate change. **Agricultural Water Management**, v. 193, p. 142–152, 2017.

MÜLLER, J.; FOLINI, D.; WILD, M.; PFENNINGER, S. CMIP-5 models project

photovoltaics are a no-regrets investment in Europe irrespective of climate change. **Energy**, v. 171, p. 135–148, 2019.

NOAA. National Oceanic and Atmospheric Administration. The First Climate Model. 2017. Disponível em: http://celebrating200years.noaa.gov/breakthroughs/climate_model/. Acesso em: 11/10/2020.

NOBRE, P.; SIQUEIRA, L. S. P.; ALMEIDA, R. A. F. DE.; MALAGUTTI, M.; GIAROLLA, E.; CASTELÃO, G. P.; BOTTINO, M. J.; KUNOTA, P.; FIGUEROA, S. N.; COSTA, M. C.; BAPTISTA JÚNIOR, M.; IRBER JÚNIOR, L.; MARCONDES, G. G. Climate simulation and change in the Brazilian climate model. **Journal of Climate**, v. 26, n. 17, p. 6716–6732, 2013.

NYASIMI, M. Review of Targets for the Sustainable Development Goals: The Science Perspective. **Journal of Education for Sustainable Development**, v. 9, n. 2, p. 237–237, 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.

OKA, K.; MIZUTANI, W.; ASHINA, S. Climate change impacts on potential solar energy production: A study case in Fukushima, Japan. **Renewable Energy**, v. 153, p. 249–260, 2020.

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. 06, n. 08, p. 221–232, 2015.

PAN, Z.; SEGAL, M.; ARRIT, R. W.; TAKLE, E. S. On the potential change in solar radiation over the US due to increases of atmospheric greenhouse gases. **Renewable Energy**, v. 24, n. 2, p. 235–243, 2004.

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.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; PES, M. P.; CRUZ SEGUNDO, E. I. DA.; LYRA, A. DE A. The impacts of global climate changes on the wind power density in Brazil. **Renewable Energy**, v. 49, p. 107–110, 2013.

PÉREZ, J. C.; GONZÁLEZ, A.; DÍAZ, J. P.; EXPÓSITO, F. J.; FELIPE, J. Climate change impact on future photovoltaic resource potential in an orographically complex archipelago, the Canary Islands.. **Renewable Energy**, v. 133, p. 749–759, 2019.

PRUDHOMME, C.; GIUNTOLI, I.; ROBINSON, E. L.; CLARK, D. B.; ARNELL, N. W.; DANKERS, R.; FEKETE, B. M.; FRANSSSEN, W.; GERTEN, D.; GOSLING, S.

N.; HAGEMANN, S.; HANNAH, D. M.; KIM, H.; MASAKI, Y.; SATOH, Y.; STACKE, T.; WADA, Y.; WISSER, D. 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, 2014.

PRYOR, S. C.; BARTHELMIE, R. J.; KJELLSTRÖM, E. Potential climate change impact on wind energy resources in northern Europe: Analyses using a regional climate model. **Climate Dynamics**, v. 25, n. 7–8, p. 815–835, 2005.

PRYOR, S. C.; BARTHELMIE, R. J.; SCHOOF, T. J. Inter-annual Variability of Wind Indices across Europe. **Wind Energy**, n. December 2005, p. 27–38, 2006.

PROJETA. Contato PROJETA. Mensagem recebida por <paulajp-rose@hotmail.com> em 03 de mar. 2021.

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.

QUEIROZ, A. R DE.; LIMA, L. M. M.; LIMA, J. W. M.; SILVA, B. C DE.; 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.

QUEIROZ, A. R. DE, FARIA, V.; LIMA, L. M. M.; LIMA, J. W. M. Hydropower revenues under the threat of climate change in Brazil Intergovernmental Panel on Climate Change. **Renewable Energy**, v. 133, p. 873–882, 2019.

RATJIRANUKOOL, S.; RATJIRANUKOOL, P. Wind Speed Projections for Electricity Application over Thailand. **Energy Procedia**, v. 79, p. 423–429, 2015.

RAVESTEIN, P.; SCHRIER, V. D.; HAARSMA, 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, n. October 2017, p. 497–508, 2018.

REBOITA, M. S.; AMARO, T. R.; SOUZA, M. R DE. Winds: intensity and power density simulated by RegCM4 over South America in present and future climate. **Climate Dynamics**, v. 51, n. 1–2, p. 187–205, 2018.

RIahi, K.; RAO, S.; KREY, V.; CHO, C.; CHIRKOV, V.; FISCHER, G.; KINDERMANN, G.; NAKICENOVIC, N.; RAFAJ, P. RCP 8.5-A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. **Climatic Change**, v. 109, n. 1, p. 33–57, 2011.

RONDEAU-GENESSE, G.; BRAUN, M. Impact of internal variability on climate change for the upcoming decades: analysis of the CanESM2-LE and CESM-LE large ensembles. **Climatic Change**, p. 1–16, 2019.

RUFFATO-FERREIRA, V.; BARRETO, R DA. C.; OSCAR JÚNIOR, A.; SILVA, L. W.; VIANA, D DE. B.; NASCIMENTO, J. A S DO.; FREITAS, M. A. V DE. 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, n. October 2015, p. 1124–1137, 2017.

RUSU, E. A 30-year projection of the future wind energy resources in the coastal environment of the Black Sea. **Renewable Energy**, v. 139, p. 228–234, 2019.

RUSU, E. An evaluation of the wind energy dynamics in the Baltic Sea, past and future projections. **Renewable Energy**, v. 160, p. 350–362, 2020.

SAILOR, D. J.; SMITH, M.; HART, M. Climate change implications for wind power resources in the Northwest United States. **Renewable Energy**, v. 33, n. 11, p. 2393–2406, 2008.

SANTOS, J. B.; VILLÁN, D. M.; CASTRILLO, A DE. M. Analysis and Cloudiness Influence on UV Total Irradiation. **International Journal of Climatology**, v. 31, p. 451-460, 2011.

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, n. 2015, p. 68–80, 2015.

SANTOS, F.; GÓMEZ-GESTEIRA, M.; CASTRO, M DE.; AÑEL, J. A.; CARVALHO, D.; COSTO 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.

SANTOS, C. A. S.; ROCHA, F. A.; RAMOS, T. B.; ALVES, L. M.; MATEUS, M.; OLIVEIRA, R. P DE.; NEVES, R. Using a hydrologic model to assess the performance of regional climate models in a semi-arid Watershed in Brazil. **Water (Switzerland)**, v. 11, n. 1, p. 1–17, 2019.

SAWADOGO, W.; REBOITA, M. S.; FAYE, A.; ROCHA, R. P DA.; ODOULAMI, R. C.; OLUSEGUN, C. F.; ADENIYI, M. O.; ABIODUN, B. J.; SYLLA, M. B.; DIALLO, I.; COPPOLA, E.; GIORGI, F. Current and future potential of solar and wind energy over Africa using the RegCM4 CORDEX-CORE ensemble. **Climate Dynamics**, 2020a.

SAWADOGO, W.; ABIODUN, B. J, OKOGBUE, E. C. Impacts of global warming on photovoltaic power generation over West Africa. **Renewable Energy**, v. 151, p. 263–277, 2020b.

SCHLOTT, M.; KIES, A.; BROWN, T.; SCHRAMM, S.; GREINER, M. The impact of climate change on a cost-optimal highly renewable European electricity network. **Applied Energy**, v. 230, n. June, p. 1645–1659, 2018.

SHEN, M.; CHEN, J.; ZHUAN, M; CHEN, H.; XU, C.; XIONG, L. Estimating uncertainty and its temporal variation related to global climate models in quantifying

climate change impacts on hydrology. **Journal of Hydrology**, v. 556, p. 10–24, 2018.

SILANG, A.; UY, S. N.; DADO, J. M.; CRUZ, F. A.; NARISMA, G.; LIBATIQUE, N.; TANGONAN, G. Wind energy projection for the Philippines based on climate change modeling. **Energy Procedia**, v. 52, p. 26–37, 2014.

SILVA, V. DE P. R.; CAMPOS, J. H. B. C.; SILVA, M. T.; AZEVEDO, P. V. Impact of global warming on cowpea bean cultivation in northeastern Brazil. **Agricultural Water Management**, v. 97, n. 11, p. 1760–1768, 2010.

SILVA, R. R. DA; HAAS, R. Ocean global warming impacts on the South America climate. **Frontiers in Earth Science**, v. 4, n. March, p. 1–8, 2016.

SILVA, P. S.; BASTOS, A.; LIBONATI, R.; RODRIGUES, J. A.; DACAMARA, C. C. Impacts of the 1.5 °C global warming target on future burned area in the Brazilian Cerrado. **Forest Ecology and Management**, v. 446, n. May, p. 193–203, 2019a.

SILVA, W. K. DE M.; FREITAS, G. P. DE.; COELHO JUNIOR, L. M.; PINTO, P. A. L. DE. A.; ABRAHÃO, R. Effects of climate change on sugarcane production in the state of Paraíba (Brazil): a panel data approach (1990–2015). **Climatic Change**, v. 154, n. 1–2, p. 195–209, 2019b.

SOARES, P. M. M.; LIMA, D. C. A.; CARDOSO, R. M.; NASCIMENTO, M. L.; SEMEDO, A. Western Iberian offshore wind resources: More or less in a global warming climate? **Applied Energy**, v. 203, n. 2017, p. 72–90, 2017.

SOLAUN, K.; CERDÁ, E. Impacts of climate change on wind energy power – Four wind farms in Spain. **Renewable Energy**, v. 145, p. 1306–1316, 2020.

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.

SPINONI, J.; VOGT, J.; NAUMANN, G.; CARRAO, H.; BARBOSA, P. Towards identifying areas at climatological risk of desertification using the Köppen–Geiger classification and FAO aridity index. **International Journal of Climatology**, v. 35, p. 2210–2222, 2014.

TAO, H.; EWEEES, A. A. E.; AL-SULTTANI, A. O.; BEYAZTAS, U.; HAMEED, M. M.; SALIH, S.; ARMANUOS, A. M.; AL-ANSARI, N.; VOYANT, C.; SHARID, S.; YASSEN, Z. M. Global solar radiation prediction over North Dakota using air temperature: Development of novel hybrid intelligence model. **Energy Reports**, v. 7, p. 136–157, 2021.

THOMSON, A. M.; CALVIN, K. V.; SMITH, S. J.; KYLE, G. P.; VOLKE, A.; PATEL, P.; DELGADO-ARIAS, S.; WISE, M. A.; CLARKE, L. E.; EDMONDS, J. A. RCP4.5: A pathway for stabilization of radiative forcing by 2100. **Climatic Change**, v. 109, n. 1, p. 77–94, 2011.

TOUHAMI, I.; CHIRINO, E.; ANDREU, J. M.; SÁNCHEZ, J. R.; BELLOT, J. Assessment of climate change impacts on soil water balance and aquifer recharge in a semiarid region in south east Spain. **Journal of Hydrology**, v. 527, p. 619–629, 2015.

VEIGA, S. F.; NOBRE, P.; GIAROLLA, E.; CAPISTRANO, V.; BAPTISTA, M.; MARQUEZ, A. L.; NILO, F. S.; BONATTI, J. P.; KUBOTA, P.; NOBRE, C. A. 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.

VIVIESCAS, C.; LIMA, L.; DIUANA, F. A.; VASQUEZ, E.; LUDOVIQUE, C.; SILVA, G. N.; HUBACK, V.; MAGALAR, L.; SZKLO, A.; LUCENA, A. F. P.; SCHAEFFER, R.; PAREDES, J. R. Contribution of Variable Renewable Energy to increase energy security in Latin America: Complementarity and climate change impacts on wind and solar resources. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 113, n. November 2017, 2019.

WACHSMUTH, J.; BLOHM, A.; GÖBLING-REISEMANN, s.; EICKEMEIER, T.; GASPER, R.; STÜHRMANN, S. 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.

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.

WANG, M.; ULLRICH, P.; MILLSTEIN, D. The future of wind energy in California: Future projections with the Variable-Resolution CESM. **Renewable Energy**, v. 127, p. 242–257, 2018.

WANG, S.; ZHU, J.; HUANG, G.; BAETZ, B.; CHENG, G.; ZENG, X.; WANG, X. Assessment of climate change impacts on energy capacity planning in Ontario, Canada using high-resolution regional climate model. **Journal of Cleaner Production**, v. 274, p. 123026, 2020.

WEBER, J.; GOTZENS, F.; WITTHAUT, D. Impact of strong climate change on the statistics of wind power generation in Europe. **Energy Procedia**, v. 153, p. 22–28, 2018.

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.

WILD, M.; FOLINI, D.; HENSCHER, F.; FISCHER, N.; MÜLLER, B. Projections of long-term changes in solar radiation based on CMIP5 climate models and their influence on energy yields of photovoltaic systems. **Solar Energy**, v. 116, p. 12–24, 2015.

WOO, S.; SINGH, G. P.; OH, J.; LEE, K. Projected changes in summer precipitation over East Asia with a high-resolution atmospheric general circulation model during 21st century. **International Journal of Climatology**, v. 38, n. 12, p. 4610–4631, 2018.

WWEA - World Wind Energy Association, 2020. Disponível em: <https://wwindea.org/organisation/board/>. Acesso em: 07/08/2020.

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.

ZHANG, X.; LIANG, S.; WANG, G.; YAO, Y.; JIANG, B.; CHENG, J. 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, 2016.

ZHANG, F.; WANG, C.; XIE, G.; KONG, W.; JIN, S.; HU, J.; CHEN, X. Projection of global wind and solar resources over land in the 21st century. **Global Energy Interconnection**, v. 1, n. 4, p. 443–451, 2018.

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.

ZOU, L.; WANG, L.; LI, J.; LU, Y.; GONG, W.; NIU, Y. Global surface solar radiation and photovoltaic power from Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 climate models. **Journal of Cleaner Production**, v. 224, p. 304–324, 2019.

ANEXO I

Informações adicionais sobre os modelos climáticos globais utilizados

Tabela I.I: Dados sobre os níveis e componentes dos modelos climáticos globais empregados nas projeções climáticas para a Região Nordeste do Brasil.

Modelos	Níveis	Resolução (latxlon)	AOGCMs (Modelos de Circulação Geral Atmosfera-Oceano)	ESM (Modelos do Sistema Terrestre)
			Componentes	Componentes
CanESM2	35	2.8125°x2.8125°	Atmosfera, superfície da terra, oceano e gelo marinho	Aerossóis, ciclo de carbono, ciclos biogeoquímicos do oceano e química da atmosfera
HadGEM2-ES	38	1.875°x1.250°	Atmosfera, superfície da terra, oceano e gelo marinho	Aerossóis, ciclo de carbono, ciclos biogeoquímicos do oceano
MIROC5	40	1.40625°x1.4008°	Atmosfera, superfície da terra, oceano e gelo marinho	Aerossóis
BESM	50	1.875°x1.875°	Atmosfera, superfície da terra, oceano e gelo marinho	Químicas globais

Fonte: Adaptado de Flato *et al.* (2013); Mohan e Bhaskaran (2019); BESM (2021); Projeta (2021).