

O que acontecerá com temperatura e umidade relativa do ar no Nordeste do Brasil nas próximas décadas?

PAULA ROSE DE ARAUJO SANTOS
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

SUSANE ETERNA LEITE MEDEIROS
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

LOUISE PEREIRA DA SILVA
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

FLAVIO DA SILVA VITORINO GOMES

RAPHAEL ABRAHÃO

Introdução

O relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) publicado em 2021 confirma que as atividades humanas são responsáveis pelas mudanças climáticas, que as temperaturas globais continuarão subindo e que algumas mudanças são irreversíveis (IPCC, 2021). Os modelos climáticos foram desenvolvidos tendo em vista a necessidade de projetar o comportamento climático futuro.

Problema de Pesquisa e Objetivo

Estudos realizados no Brasil por Marengo et al. (2012) projetaram um aumento da temperatura e uma redução da precipitação para a maior parte do país. Assim, este artigo teve como objetivo projetar as condições de temperatura do ar (média, máxima e mínima) e umidade relativa do ar para a região Nordeste do Brasil, aplicando um conjunto de três modelos climáticos globais associados a um modelo climático regional. O período de referência (1961-1990) foi comparado com os períodos futuros de 2040-2069 e 2070-2099 utilizando os cenários do IPCC RCP4.5 e RCP8.5.

Fundamentação Teórica

Os modelos climáticos foram desenvolvidos tendo em vista a necessidade de projetar o comportamento climático futuro. O primeiro modelo de circulação geral associou processos oceânicos e atmosféricos e foi desenvolvido na Universidade de Princeton (Estados Unidos), no final da década de 1960, no Laboratório de Dinâmica de Fluidos Geofísica da NOAA (NOAA, 2017). Os modelos são capazes de projetar dados futuros sobre temperatura do ar, umidade relativa e outros parâmetros para diferentes áreas e períodos de tempo. (Queiroz et al., 2016).

Metodologia

Os dados de projeção foram gerados a partir de três modelos climáticos globais (GCMs): BESM, HadGEM2-ES e CanESM2, associados com o modelo regional Eta obtido no Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC-INPE) por meio da plataforma Projeta. Os dados de projeção utilizados neste trabalho consideraram o período de referência 1961-1990 e os períodos futuros 2040-2069 e 2070-2099.

Análise dos Resultados

O cenário RCP8.5 (altas emissões) apresentou aumentos de temperatura superiores aos observados no cenário RCP4.5, com os maiores resultados para o final do século XXI. Apesar disso, as projeções em algumas áreas localizadas nos estados da Bahia, Alagoas e Sergipe, e apenas no modelo Eta-CanESM2, indicaram um aumento maior da temperatura mínima do ar no cenário de emissões moderadas em 2070-2099. As projeções sob os cenários RCP4.5 e RCP8.5 em ambos os períodos futuros indicaram aumentos maiores para a temperatura máxima do ar no cenário de altas emissões em 2070-2099.

Conclusão

Foram projetadas temperaturas superiores às do período de referência para os dois períodos futuros em ambos os cenários RCP, com exceção de alguns pontos para a temperatura máxima no cenário RCP4.5 pelo modelo Eta-BESM. Os maiores aumentos de temperatura foram projetados para o período 2070-2099 no RCP8.5 ao comparar o período histórico com o futuro nos dois cenários RCP para toda a região. Os resultados também indicaram projeções de aumentos excessivos de temperatura para áreas do Maranhão, Piauí e Bahia para os modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 para o cenário RCP8.5 em 2070-2099.

Referências Bibliográficas

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.

Palavras Chave

Mudanças climáticas, Modelo climático, Cenários

Agradecimento a órgão de fomento

Os autores agradecem o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (projeto 308753/2021-6 e bolsas 142451/2018-5 e 481593/2020-00), à Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba (FAPESQ) (projeto do edital nº 09/2021 Demanda Universal) e à Universidade Federal da Paraíba (projetos PVK13163-2020 e PVK13070-2020).

O que acontecerá com temperatura e umidade relativa do ar no Nordeste do Brasil nas próximas décadas?

Resumo

Os efeitos das mudanças climáticas já estão sendo sentidos em toda a sociedade, por exemplo, aumentos já observados nas temperaturas do ar e mudanças nos padrões de chuvas em diferentes áreas do planeta são indícios claros de que o clima está mudando. Assim, modelos climáticos globais (GCM) e regionais (RCM) vêm sendo desenvolvidos com a crescente preocupação de entender como o clima se comportará nas próximas décadas. Os modelos são capazes de projetar condições climáticas futuras, levando em consideração parâmetros de temperatura do ar, precipitação, umidade relativa do ar, entre outros. No presente trabalho foram utilizados os modelos climáticos globais BESM, HadGEM2-ES e CanESM2 associados ao modelo climático regional Eta e foram feitas projeções para temperatura máxima, média e mínima do ar e umidade relativa do ar no período 2040-2069 e 2070-2099 dos cenários RCP4.5 e RCP8.5 para toda a região Nordeste do Brasil. Os resultados mostraram um aumento nas temperaturas futuras, o que pode gerar uma série de adversidades para a região. Além disso, a redução predominante da umidade relativa do ar pode ser um fator que contribui para a seca em uma região já severamente afetada pela escassez de água.

Palavras-chave: Mudanças climáticas; modelo climático; cenários; seca.

Abstract

The effects of climate change are already being felt throughout society, for example observed increases in air temperatures and changes in rainfall patterns in different areas of the planet are clear indications that climate is changing. Thus, global (GCM) and regional (RCM) climate models have been developed with the growing concern to understand how climate will behave in the coming decades. The models are able to project future climate conditions, taking into account air temperature, precipitation, and relative air humidity parameters, among others. In the present work, the BESM, HadGEM2-ES and CanESM2 global climate models associated with the Eta regional climate model were used and projections were made for maximum, average and minimum air temperature and relative air humidity in the period 2040-2069 and 2070-2099 from the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios 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 air humidity may be a contributing factor to drought in a region severely affected by water scarcity.

Keywords: Climate change; climate model; scenarios; drought.

1

1. Introdução

O relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) publicado em 2021 confirma que as atividades humanas são responsáveis pelas mudanças climáticas, que as temperaturas globais continuarão subindo e que algumas mudanças são irreversíveis (IPCC, 2021).

Os modelos climáticos foram desenvolvidos tendo em vista a necessidade de projetar o comportamento climático futuro. O primeiro modelo de circulação geral associou processos oceânicos e atmosféricos e foi desenvolvido na Universidade de Princeton (Estados Unidos), no final da década de 1960, no Laboratório de Dinâmica de Fluidos Geofísica da NOAA (NOAA, 2017). Os modelos são capazes de projetar dados futuros sobre temperatura do ar, umidade relativa e outros parâmetros para diferentes áreas e períodos de tempo. (Queiroz et al., 2016).

Os cenários de Caminhos Representativos de Concentração (RCP), apresentados nos relatórios do IPCC, caracterizam cenários climáticos futuros considerando concentrações

potenciais de gases de efeito estufa e forçamento radiativo, sendo o RCP2.6 o mais otimista e o RCP8.5 o mais pessimista (Hdidouan e Staffell, 2017; Müller et al., 2019).

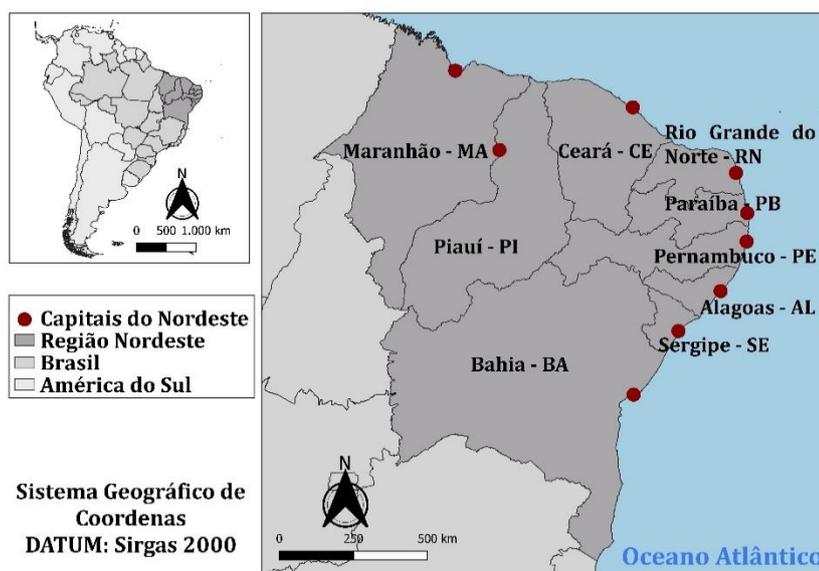
Estudos realizados no Brasil por Marengo et al. (2012) projetaram um aumento da temperatura e uma redução da precipitação para a maior parte do país. No caso de Marengo e Bernasconi (2015), as projeções indicaram aumento da temperatura e diminuição da precipitação nas regiões oeste e semiárido do Nordeste brasileiro, bem como diminuição da umidade relativa do ar.

Assim, este artigo teve como objetivo projetar as condições de temperatura do ar (média, máxima e mínima) e umidade relativa do ar para a região Nordeste do Brasil, aplicando um conjunto de três modelos climáticos globais associados a um modelo climático regional. O período de referência (1961-1990) foi comparado com os períodos futuros de 2040-2069 e 2070-2099 utilizando os cenários do IPCC RCP4.5 e RCP8.5.

2. Material e Métodos

2.1 Caracterização da Área de Estudo

A região Nordeste do Brasil possui uma área territorial de aproximadamente 1.552.167,01 km² e uma população estimada de 57.374.243 pessoas divididas em nove estados (Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Bahia) (IBGE, 2019; IBGE, 2020) (Fig. 1).



o úmido, o tropical e o tropical semiárido (Costa et al., 2020). As temperaturas do ar atingem valores anuais elevados que variam entre 20°C e 28°C. As temperaturas nas áreas baixas e na costa estão entre 24°C e 26°C. Em contrapartida, alguns locais acima de 200 m de altitude podem atingir médias anuais abaixo de 20°C (Lima et al., 2019; Costa et al., 2020).

2.2 Dados dos modelos climáticos

Os dados de projeção foram gerados a partir de três modelos climáticos globais (GCMs): BESM (Brazilian Earth System Model), HadGEM2-ES (*Hadley Global Environment Model 2 - Earth System*) e CanESM2 (*Second Generation of the Canadian Earth System Model*), associados com o modelo regional Eta obtido no Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC-INPE) por meio da plataforma 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 é baseado na estrutura do modelo acoplado oceano-atmosfera do CPTEC usado para previsões meteorológicas estendidas e climáticas sazonais (Veiga et al., 2019). O BESM é acoplado ao modelo oceânico MOM4 (*Modular Ocean Model 4*) e os processos da superfície terrestre são representados pelo modelo SSIB (*Simple Biosphere Model*). Além disso, levam em consideração o gelo marinho e a vegetação (Chou et al., 2014b) e visam gerar cenários levando em consideração a perspectiva brasileira. O modelo incorpora processos de formação de nuvens, dinâmica da vegetação e a influência dos biomas brasileiros (BESM 2021). HadGEM2-ES é a segunda versão do HadGEM. O modelo integra o ciclo do carbono terrestre e oceânico e a química da atmosfera (Martin et al., 2011). O modelo CanESM2 é integrado pelo modelo físico-atmosfera-oceano (CanCM4), acoplado a um modelo de carbono terrestre (CTEM) e um modelo de carbono oceânico (CMOC) (Soospedra-Alfonso e Merryfield, 2017). O RCM Eta foi desenvolvido pela Universidade de Belgrado em conjunto com o Instituto de Hidrometeorologia da Iugoslávia e operado pelos Centros Nacionais de Previsão Ambiental (NCEP) (Ruffato-Ferreira et al., 2017). Os processos da superfície terrestre são representados pelo esquema do modelo de superfície terrestre de Noah (Ek et al., 2003), a microfísica das nuvens é baseada no esquema de Zhao et al. (1997), a radiação de onda curta está representada em Lacis e Hansen (1974), e a radiação de onda longa em Fels e Schwarzkopf (1975).

As condições climáticas futuras foram representadas por dois cenários RCP (RCP4.5 e RCP8.5) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2014). O RCP4.5 é considerado um cenário intermediário, onde seriam tomadas iniciativas para limitar as emissões de gases de efeito estufa na atmosfera e estabilizar o forçamento 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 de efeito estufa e nenhuma iniciativa específica para mitigar os impactos climáticos. Nesse cenário, o forçamento radiativo atingiria $8,5 \text{ Wm}^{-2}$ até o final do século XXI (Riahi et al., 2011). Esses cenários se assemelham ao SSP2-4.5 (moderado), SSP3-7.0 e SSP-5-8.5 (pessimista) empregados no relatório do IPCC 2021 (IPCC, 2021).

Os dados de projeção utilizados neste trabalho consideraram o período de referência 1961-1990 e os períodos futuros 2040-2069 e 2070-2099. Foram realizadas projeções anuais e sazonais: DJF: dezembro-janeiro-fevereiro, MAM: março-abril-maio, JJA: junho-julho-agosto e SON: setembro-outubro-novembro. Foram analisados os parâmetros temperatura máxima, média e mínima do ar e umidade relativa do ar, distribuídos em 3237 pontos da região Nordeste do Brasil.

3. Resultados e Discussão

3.1 Temperaturas média, máxima e mínima do ar

As mudanças de temperatura média, mínima e máxima anual do ar projetadas nos modelos Eta-BESM, Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 podem ser observadas em detalhes na Fig. 2, Fig. 3 e Fig. 4.

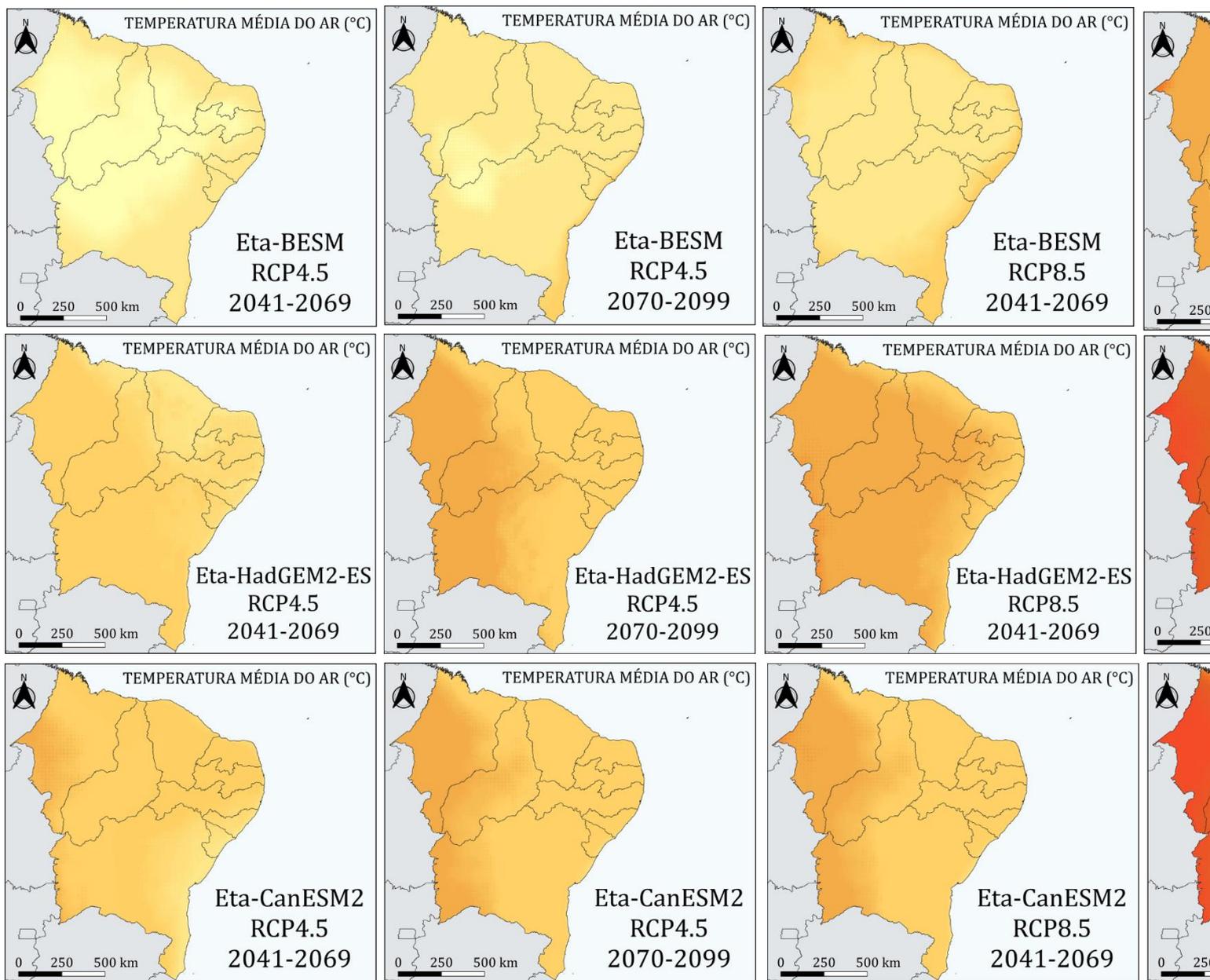


Fig. 2. Anomalias de temperatura média anual nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 nos períodos 2040-2069 dos modelos Eta-BESM, Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 na região Nordeste do Brasil.

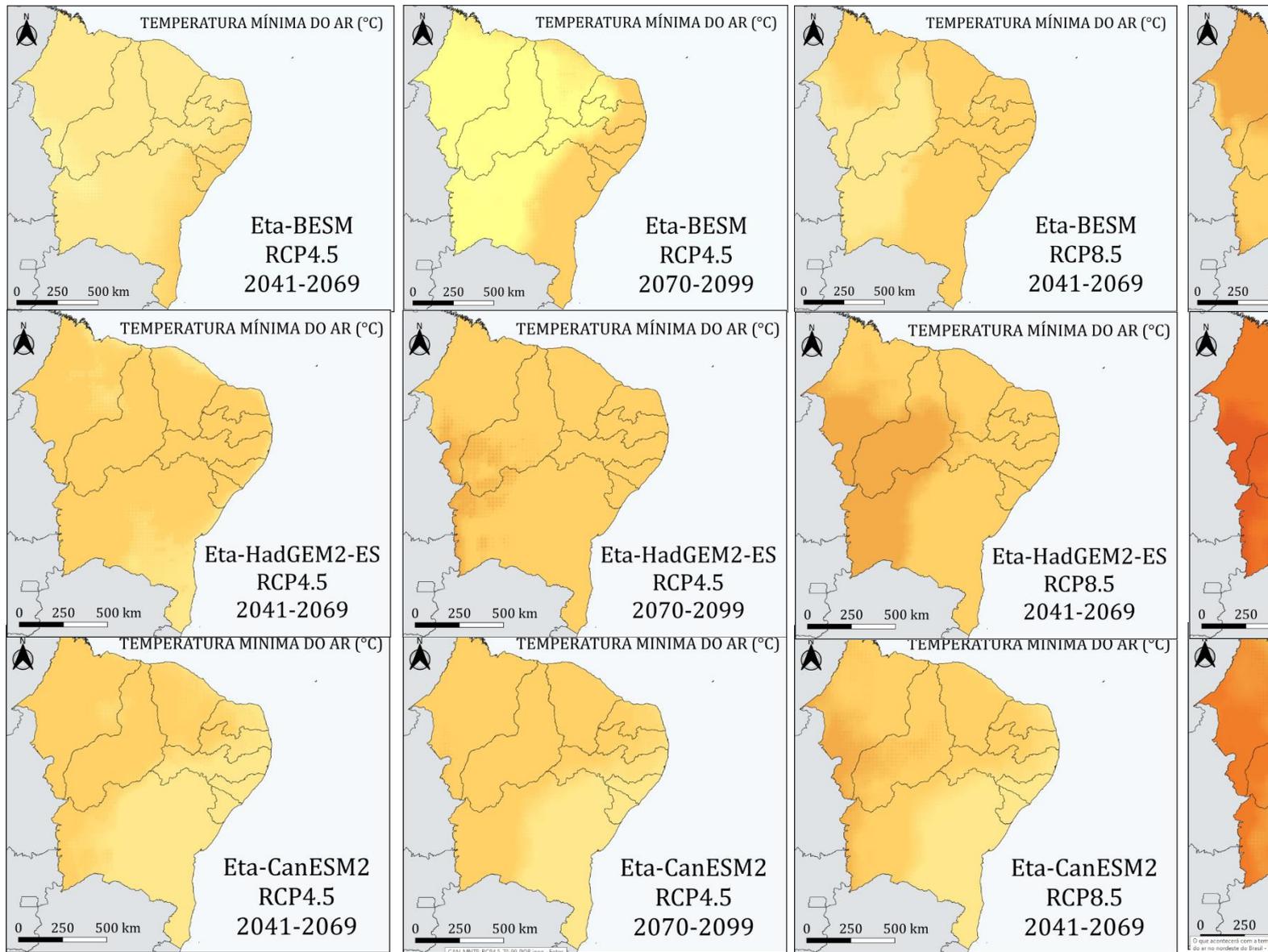


Fig. 3. Anomalias de temperatura mínima anual nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 nos períodos 2040-2069 dos modelos Eta-BESM, Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 na região Nordeste do Brasil.

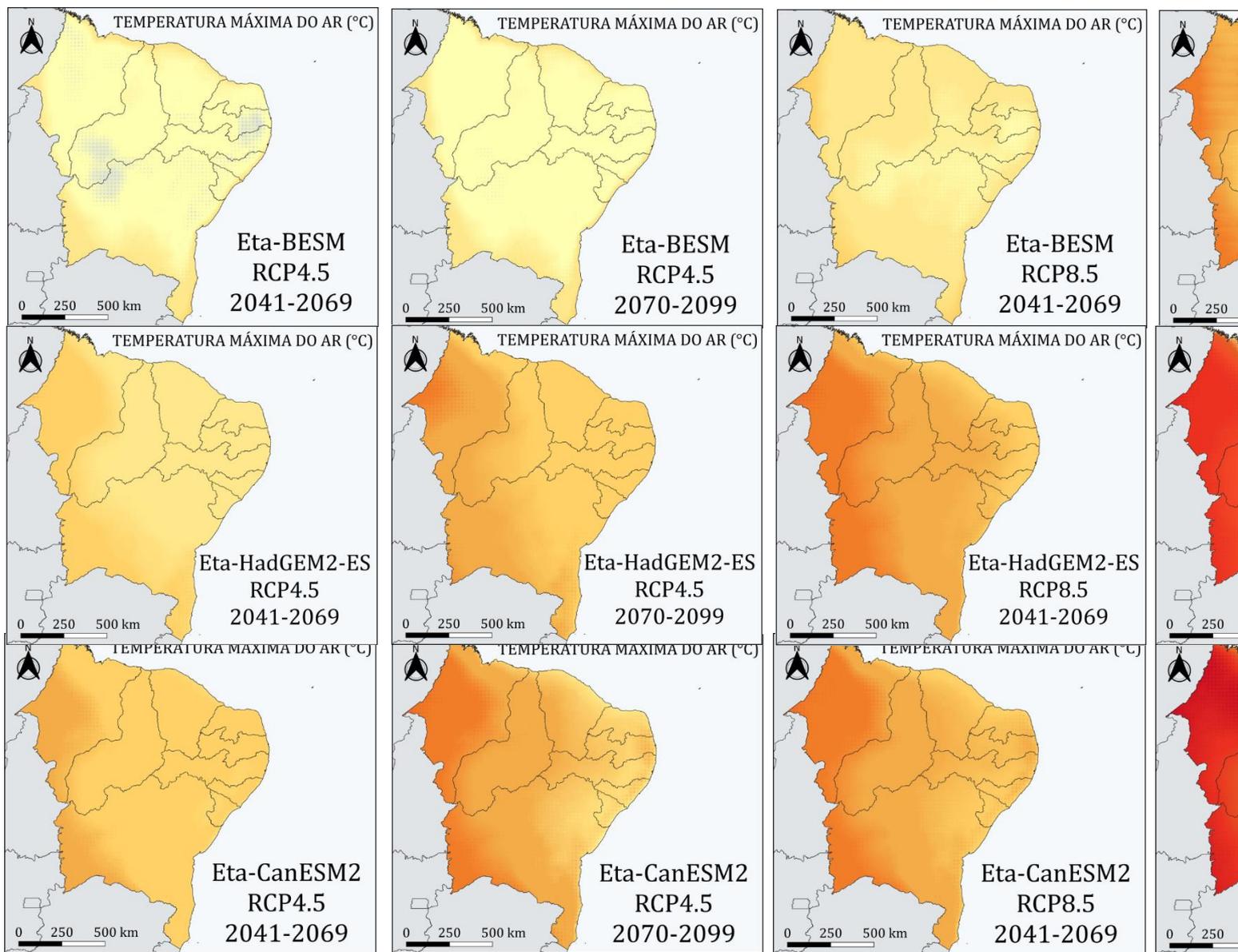


Fig. 4. Anomalias de temperatura máxima anual nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 nos períodos 2040-2069 nos modelos Eta-BESM, Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 na região Nordeste do Brasil.

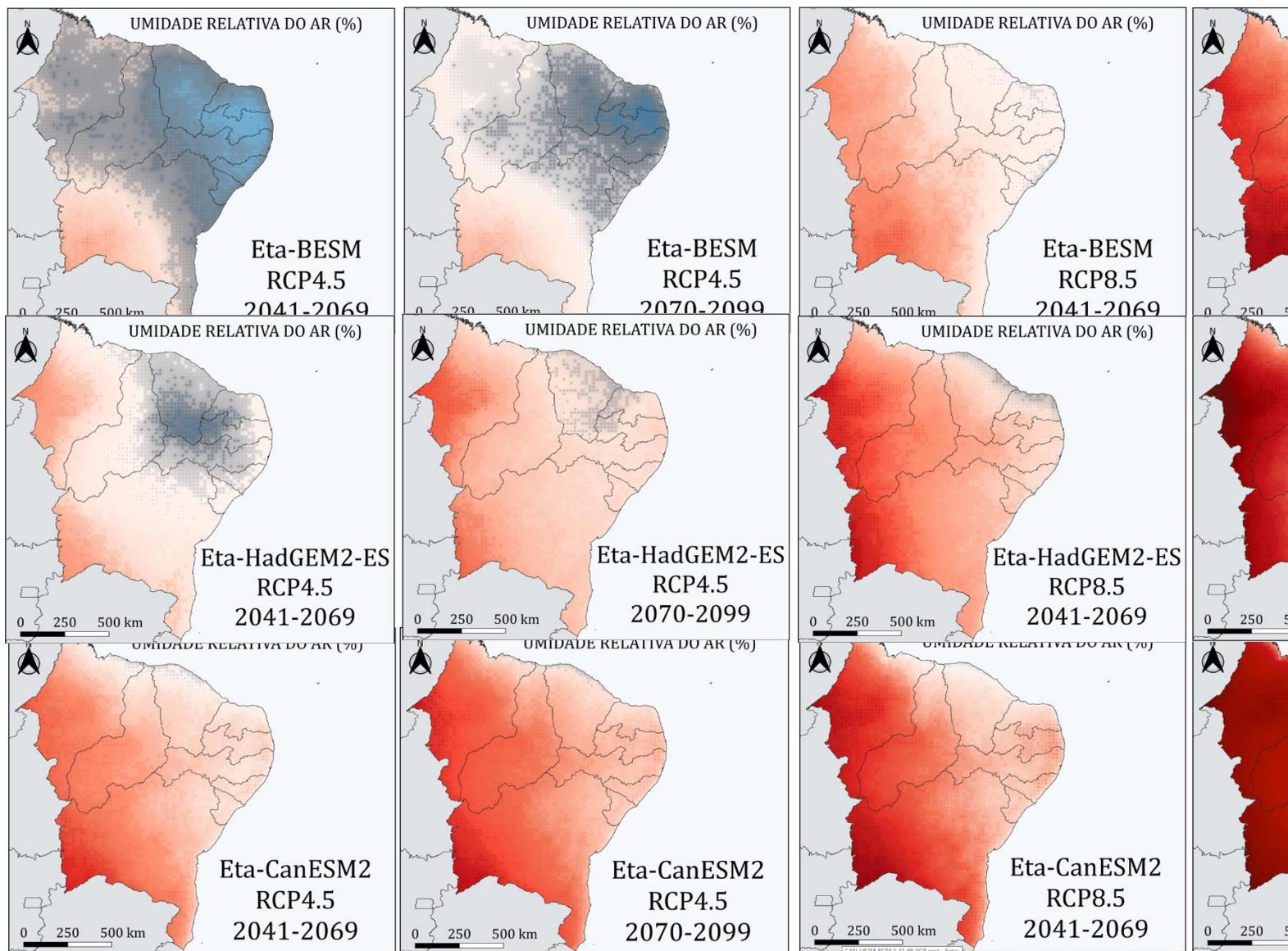


Fig. 5. Anomalias de umidade relativa do ar anual nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 nos períodos 2040-2069 nos modelos Eta-BESM, Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 na região Nordeste do Brasil.

O cenário RCP8.5 (altas emissões) apresentou aumentos de temperatura superiores aos observados no cenário RCP4.5, com os maiores resultados para o final do século XXI. Apesar disso, as projeções em algumas áreas localizadas nos estados da Bahia, Alagoas e Sergipe, e apenas no modelo Eta-CanESM2, indicaram um aumento maior da temperatura mínima do ar no cenário de emissões moderadas em 2070-2099 (Fig. 3).

As projeções sob os cenários RCP4.5 e RCP8.5 em ambos os períodos futuros indicaram aumentos maiores para a temperatura máxima do ar no cenário de altas emissões em 2070-2099, e mais significativamente no Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2. No entanto, inesperadamente houve uma possível redução da temperatura máxima do ar em áreas específicas de todos os estados da região Nordeste do Brasil no cenário de emissões moderadas no modelo Eta-BESM (Fig. 4).

O estudo de Marengo e Bernasconi (2015) descreveu um aquecimento de 2°C (2010-2040) e um aumento de 2°C a 4°C no semiárido do Nordeste (2041-2070), com resultados de elevação acima de 4°C para o final do século XXI a partir das projeções feitas com o modelo Eta-HadCM3. Os resultados são semelhantes aos observados neste artigo. Além disso, foi projetado um aumento acima de 2°C para a temperatura média e mínima do ar no RCP8,5 em 2070-2099 para o modelo Eta-BESM para todo o Nordeste. O mesmo ocorreu no modelo Eta-HadGEM2-ES para as temperaturas médias, mínimas e máximas do ar no cenário RCP8.5 e no cenário RCP4.5 para o final do século XXI. Além disso, houve um aumento de mais de 3,5°C nas temperaturas no cenário RCP8.5 e apenas para 2070-2099 no modelo Eta-HadGEM2-ES. No entanto, as projeções feitas por Marengo et al. (2017) geraram resultados de um aumento acima de 5°C em RCP8.5 em 2071-2100 para a mesma região usando um conjunto de modelos climáticos CMIP5.

Projeções para 31 localidades no Brasil, incluindo localidades nos estados do Maranhão, Piauí e Bahia realizadas por Bender e Sentelhas (2018) mostraram um aumento na temperatura máxima e mínima do ar para áreas do Norte e Nordeste quando o período histórico (1980- 2009) foi comparado com o futuro (2040-2060 e 2070-2099).

No caso de Silva et al. (2019a), os autores identificaram que a temperatura no Cerrado brasileiro pode aumentar ao comparar o período histórico (1976-2005) com o futuro (2021-2050 e 2071-2100), sendo mais intensa no final do século XXI no cenário RCP8.5.

Resultados consistentes com os estudos de Bender e Sentelhas (2018) e Silva et al. (2019a) foram observados no presente trabalho. As projeções expressaram um aumento nas temperaturas para os estados mencionados em que o bioma Cerrado está localizado na região Nordeste do Brasil. O aumento médio das temperaturas foi superior a 2°C para os três estados (Maranhão, Piauí e Bahia), com exceção da temperatura máxima do ar no modelo Eta-BESM. Segundo Santos e cols. (2019), o aumento médio das temperaturas máximas e mínimas do ar nos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5 para a bacia do Rio Paraguaçu na Bahia é de 0,85°C e 1,5°C no RCP4,5, e 0,8°C e 1,0°C em RCP8.5, respectivamente.

Althoff et al. (2016) projetaram um aumento médio de 4°C (2011-2040) na temperatura mínima do ar, chegando a 6°C até o final do século XXI. No caso da temperatura máxima do ar, os autores projetaram um aumento de 6°C, podendo eventualmente chegar a 7,5°C no final do século XXI utilizando o modelo Eta no cenário A1B no município de Santa Teresinha, no estado da Paraíba. No presente estudo, observou-se que o maior aumento da temperatura máxima do ar para o estado da Paraíba ocorreu no modelo Eta-HadGEM2-ES para o cenário RCP8.5 no final do século XXI, sendo superior a 5°C para algumas áreas do estado. Aumentos excessivos da temperatura do ar no estado da Paraíba também têm sido observados por meio de tendências em dados históricos medidos em estações meteorológicas (Medeiros et al., 2021). Segundo Medeiros et al. (2019), os resultados da análise de tendência

para o semiárido do estado da Paraíba mostraram aumentos significativos na temperatura média do ar. Esses resultados observacionais (séries históricas) confirmam as projeções dos modelos climáticos.

Os autores observaram um aumento de 7,8°C, 10,3°C e 5,2°C para as temperaturas média, máxima e mínima do ar, respectivamente, no cenário de altas emissões. No presente estudo, o aumento da temperatura do ar nos municípios de Apodi, Ipanguaçu e Mossoró ficou abaixo de 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 um aumento nas temperaturas máximas e mínimas do ar até o final do século XXI usando o modelo Eta. Os autores relataram um aumento de 2-3°C nas temperaturas mínimas e máximas do ar no cenário de baixas emissões, e de 4-5°C (mínimo) e 3-5°C (máximo) no cenário de altas emissões pelo final do século XXI para ambos os municípios. Em linha com os resultados do trabalho de Carvalho et al. (2015), as projeções de aumento de temperatura no presente trabalho foram geradas em todos os modelos para os municípios de Itambé e Goiana com aumento acima de 4°C no cenário RCP8.5 para o final do século XXI no Eta-HadGEM2-ES.

Resultados extremos neste artigo foram projetados por Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 para os estados do Maranhão, Piauí e Bahia no cenário RCP8.5 para o final do século XXI. Os dados mostraram um aumento acima de 5°C, 6°C e 7°C nas temperaturas do ar mínima, média e máxima, respectivamente. De Jong et al. (2019) indicaram um aumento acima de 6°C até 2100 a partir de um conjunto de modelos climáticos para a cidade de Imperatriz no estado do Maranhão, enquanto Marengo et al. (2017) indicaram um 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 foram projetados resultados acima de 6°C e 8°C para temperaturas médias e máximas do ar, respectivamente, com os modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 para Imperatriz no estado do Maranhão no cenário RCP8.5 em 2070-2099.

3.2 Umidade Relativa do Ar

As mudanças na umidade relativa do ar projetadas a partir do conjunto de modelos climáticos associados aos cenários RCP4.5 e RCP8.5 podem ser observadas na Fig. 5. As projeções para redução da umidade relativa do ar no Nordeste brasileiro são predominantes em todos os modelos, com a exceção do modelo Eta-BESM no cenário de emissões moderadas. A diminuição da umidade é maior à medida que se afasta da costa e é mais significativa no cenário RCP8.5 em 2070-2099 (Fig. 5). Os resultados nas projeções de Silva et al. (2019a) para o Cerrado brasileiro também indicou redução da umidade do ar para o período 2021-2050 nos cenários RCP2.6, RCP4.5 e RCP8.5, e mais intensamente no cenário de altas emissões no final do século XXI.

De acordo com Marengo e Bernasconi (2015), reduções entre -5% e -15% estão previstas para a umidade relativa do ar para a região Nordeste até o ano de 2100. Segundo Cavalcante Junior et al. (2016), a redução da umidade do ar para os meses de março a maio do ano de 2100 será de -9,8% no cenário B2, e -16,1% no cenário A2 para os municípios de Apodi, Ipanguaçu e Mossoró (todos no Nordeste Brasil). A maior redução para esses municípios neste trabalho foi encontrada para Apodi (-3%) no cenário de altas emissões e no período 2070-2099 usando o modelo Eta-CanESM2.

3.3. Consequências Potenciais

Reboita et al. (2018) projetaram aumentos de dias secos consecutivos e redução de dias frios consecutivos para junho-julho-agosto no Nordeste do Brasil, além dos aumentos de temperatura para a América do Sul. As projeções para os períodos de 2040-2069 e 2070-2099 neste artigo mostraram um aumento da temperatura e uma redução predominante da umidade relativa do ar, o que poderia tornar o clima da região Nordeste ainda mais seco. Um cenário de aumento na frequência de dias secos futuros foi observado por Marengo et al. (2017), que denotou o aumento gradual do índice de dias secos consecutivos até o final do século XXI.

Prudhomme et al. (2014) mostraram um aumento na frequência de seca para o Nordeste do Brasil em 2070-2099 a partir de um multimodelo com o cenário RCP8.5. 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 ocorrem de forma mais intensa, principalmente no final do século XXI

As mudanças climáticas projetadas podem afetar diversas atividades humanas, incluindo a produção agrícola. Lucena et al. (2009) indicaram que a produção de soja será impactada negativamente no Nordeste e Centro-Oeste do Brasil devido ao aumento da temperatura do ar. Por sua vez, Silva et al. (2019b) observaram que as temperaturas mais altas observadas no período 1990-2015 influenciaram negativamente a produção de cana-de-açúcar no estado da Paraíba (Nordeste do Brasil). Esse cenário pode se agravar no futuro. Em 2040-2069, para o estado da Paraíba, por exemplo, os resultados mostraram um aumento das temperaturas acima de 2°C para os modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2.

Resultados previstos por Cavalcante Junior et al. (2016) para os municípios de Apodi, Ipanguaçu e Mossoró no estado do Rio Grande do Norte, onde o aumento de temperatura projetado ultrapassará o limite tolerado pela cultura do feijão-caupi em 2100, impactando negativamente no desenvolvimento e produtividade da cultura. Esses dados são consistentes com os observados no presente estudo para os três municípios, onde são esperados aumentos de temperatura em todos os cenários, estando acima de 4°C sob o RCP8.5 no final do século XXI no modelo Eta-HadGEM2-ES. Enquanto isso, a umidade relativa do ar será reduzida no cenário de altas emissões para Apodi, Ipanguaçu e Mossoró de acordo com todos os modelos. No estudo de Silva et al. (2010), referindo-se também ao cultivo do feijão-caupi, os autores observaram que a disponibilidade de áreas adequadas para o plantio dessa cultura sofrerá uma redução devido ao aumento da temperatura do ar no Nordeste brasileiro.

Os modelos aqui aplicados projetaram um futuro aumento das temperaturas e redução da umidade relativa do ar no Nordeste do Brasil. Diante dos resultados observados por Lucena et al. (2009), Cavalcante Junior et al. (2016) e Silva et al. (2019b), essas mudanças podem causar sérias reduções na produção de soja e no cultivo de feijão-caupi e cana-de-açúcar. Outras culturas sensíveis, principalmente devido ao aumento da temperatura, também serão afetadas, assim como outras atividades humanas desenvolvidas nesta região, como geração de eletricidade, abastecimento de água, turismo e pecuária.

Diferentemente dos estudos citados que utilizaram modelos climáticos, Medeiros et al. (2021) realizaram a análise de dados climáticos históricos e estimados a fim de observar os impactos das mudanças climáticas no potencial de geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis, principalmente hidrelétrica e solar fotovoltaica em parte do Nordeste do Brasil. Os autores observaram uma tendência de aumento significativo na temperatura do ar, o que não foi suficiente para alterar a capacidade de geração de eletricidade dos painéis fotovoltaicos. É importante estudar se futuros aumentos de temperatura impactarão ou não o potencial fotovoltaico da região. Apesar dos resultados mostrarem que alterações na

temperatura e na umidade relativa do ar serão mais intensas no final do século XXI, em 2040-2069 essas mudanças já serão observadas.

4. Conclusão

O presente trabalho utilizou o conjunto de três modelos climáticos globais associados a um modelo climático regional Eta para fazer um prognóstico relacionado aos elementos climáticos em períodos futuros (2040-2069 e 2070-2099) e tomando o período histórico (1961-1990) para os cenários RCP4.5 e RCP8.5 como referência. Foram analisados os parâmetros de temperatura média, mínima e máxima do ar e umidade relativa do ar para toda a região Nordeste do Brasil.

Foram projetadas temperaturas superiores às do período de referência para os dois períodos futuros em ambos os cenários RCP, com exceção de alguns pontos para a temperatura máxima no cenário RCP4.5 pelo modelo Eta-BESM. Os maiores aumentos de temperatura foram projetados para o período 2070-2099 no RCP8.5 ao comparar o período histórico com o futuro nos dois cenários RCP para toda a região. Os resultados também indicaram projeções de aumentos excessivos de temperatura para áreas do Maranhão, Piauí e Bahia para os modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 para o cenário RCP8.5 em 2070-2099.

Os resultados para umidade relativa do ar mostraram uma redução predominante nas projeções para os três modelos, com exceção do modelo Eta-BESM (somente no cenário de emissões moderadas). As diminuições são maiores no cenário RCP8.5 em 2070-2099, o que pode intensificar ainda mais a situação hídrica em algumas áreas semiáridas.

Os resultados projetados pelos modelos climáticos utilizados indicam que os aumentos nas temperaturas e reduções na umidade relativa do ar já serão intensificados nas próximas décadas, conforme já detectado em estudos com dados históricos para a maior parte do Nordeste do Brasil. Acrescenta-se que o semiárido nordestino é conhecido por seus problemas de degradação ambiental, principalmente pelos processos de desertificação, que podem ser maximizados devido ao aumento da temperatura do ar associado à redução da umidade relativa do ar. É prudente considerar o planejamento de medidas de adaptação por parte dos gestores públicos para reduzir os impactos negativos na população e em todas as atividades realizadas nesta vasta região.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (projeto 308753/2021-6 e bolsas 142451/2018-5 e 481593/2020-00), à Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba (FAPESQ) (projeto do edital nº 09/2021 Demanda Universal) e à Universidade Federal da Paraíba (projetos PVK13163-2020 e PVK13070-2020).

Referências

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. Available at: <http://www.inpe.br/besm/>.

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.

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 semiarid 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.; 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: 05/08/2022.

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: 05/08/2022.

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.

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.

IBGE - Brazilian Statistics Institute. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cidades e Estados, 2019. Available at: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados.html>.

IBGE - Brazilian Statistics Institute. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cidades e Estados, 2020. Available at: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados.html?view=municipio>.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, 2021.

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.

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. **Theoretical and Applied Climatology**. 2017.

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. 147 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.

MEDEIROS S.E.L.; Abrahão R; Silva L.P.; SILVA, W. K. M. Comparison between observed and estimated data to assess air temperature variability and trends in the Sertão Paraibano mesoregion (Brazil). **Environmental Monitoring and Assessment** 191(2), 1-12, 2019.

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.

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. Available at: http://celebrating200years.noaa.gov/breakthroughs/climate_model/.

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.

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, 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.

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.

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.

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.